REV
6310

# REVISTA DE LA ACADEMIA CANARIA DE CIENCIAS

MCZ

Folia Canariensis Academiae Scientiarum

Volumen II (1990)

MCZ
LIBRARY

FEB 14 2013

HARVARD
UNIVERSITY

MCZ
LIBRARY

FEB 11 2015

HARVARD
UNIVERSITY

# REVISTA
# DE LA ACADEMIA
# CANARIA DE CIENCIAS

Sección

## QUIMICA

Sección

## BIOLOGIA

Folia Canariensis Academiae Scientiarum

Volumen II (1990)

# REVISTA DE LA ACADEMIA CANARIA DE CIENCIAS

**Folia Canariensis Academiae Scientiarum**

**Director - Editor**
Nácere Hayek Calil

**Secretario**
Jorge Fuentes Duchemín

**Comité Editorial**

Francisco Sánchez Martínez
Francisco García Montelongo
José Manuel Méndez Pérez
Juan José Bacallado Aránega

Publica: **Academia Canaria de Ciencias,**
con la colaboración de
**Gobierno Autónomo Canario,**
**Cabildo Insular de Tenerife** y
**CajaCanarias.**

ISSN: 1130-4723 Depósito Legal: **S. 212 - 1990**

Imprime: **GRAFICAS VARONA**
Rúa Mayor, 44. Teléf.26 33 88. Salamanca.

# PRESENTACION

Este volumen de la Revista de la Academia Canaria de Ciencias se destina a artículos de investigación relativos a las Secciones de Química y Biología. Al igual que en el primero ( que recogía trabajos de las de Matemáticas y Física ), en este también se incluyen trabajos en la Sección de Historia y Filosofía de la Ciencia.

De ahora en adelante y en la medida de lo posible, se dedicará un volumen a cada una de las Secciones que componen la Academia ( Matemáticas, Física, Química y Biología ). De no existir suficiente número de trabajos de algunas de ellas, éstos serán publicados en el volumen que corresponda a la Sección más afín. En cualquier caso, se mantendrá para cada volumen la Sección de Historia y Filosofía de la Ciencia.

Una vez más, nuestro agradecimiento a todos los autores que nos han enviado sus trabajos, y a las corporaciones e instituciones que hacen posible la publicación de esta Revista, en especial al Cabildo Insular de Tenerife, Caja General de Ahorros de Canarias y Gobierno Autónomo canario.

El Director

Nácere Hayek

# REVISTA DE LA ACADEMIA CANARIA DE CIENCIAS

Folia Canariensia Academiae Scientiarum

SECCION

# QUIMICA

Rev.Acad.Canar.Cienc., II,9 - 14 (1990)

# COEFICIENTES DE ACTIVIDAD DE DISOLUCIONES ACUOSAS DE $ZnSO_4$ POR MEDIDAS DE F.E.M.

J. Morales, M. C. Arévalo y A. Arévalo

Departamento de Química Física

Universidad de La Laguna (Tenerife)

SUMMARY.- A simple system is described to obtain the activity coeficientes on $ZnSO_4$ aqueous solutions from e.m.f. measurements, using a electrochemical double cell.

RESUMEN.- Se describe un sistema para obtener coeficientes de actividad de disoluciones acuosas de $ZnSO_4$ por medidas de f.e.m. utilizando un montaje de pila doble.

## INTRODUCCION

Las células electroquímicas se utilizan para determinar diversas magnitudes termodinámicas como son $\Delta G$, $\Delta H$, $\Delta S$, constantes de equilibrio, coeficientes de actividad, etc. La bondad de los datos termodinámicos obtenidos a partir de pilas galvánicas está relacionada con la no existencia de potenciales de difusión por lo que debe trabajarse, siempre que sea posible, con sistemas que no contengan puentes salinos, ni uniones líquidas entre dos o más disoluciones electrolíticas; lo anterior justifica que las células de concentración sin transporte, llamadas también pilas dobles de Helmholtz[1], constituyan sistemas muy adecuados para la determinación directa de numerosas magnitudes termodinámicas[2].

En esencia, una pila doble, no es sino la asociación de dos pilas electroquímicas, conectadas sin uniones líquidas, a través

de un electrodo común. Aunque su formulación es muy sencilla, en la práctica su uso puede implicar algunas dificultades de tipo experimental. Así por ejemplo, en la determinación de coeficientes de actividad a partir de medidas de f.e.m. de pilas dobles se precisan electrodos reversibles a los cationes y aniones de la especie ionica a estudiar, lo que obliga, en el caso de los cationes de los metales alcalinos y alcalinoterreos a utilizar electrodos de amalgama o electrodos de vidrio selectivos al catión, con las consiguientes complicaciones que ello conlleva[3].

La presente comunicación tiene por objeto presentar un nuevo sistema que permite determinar coeficientes de actividad de disoluciones concentradas de $ZnSO_4$ por medidas de f.e.m. de pilas de concentración sin transporte siguiendo el método descrito por Glasstone[4] . La elección del electrólito obedece al hecho de que el Zn puede ser utilizado muy satisfactoriamente como electrodo reversible a sus iones en células para la medidas de datos termodinámicos, ya que tiene una corriente de intercambio (velocidad en el potencial de equilibrio) muy elevada tanto para la reacciones de oxidación como para la de reducción.

La puesta a punto de la experiencia se ha realizado con vistas a su inclusión en el curso de prácticas de laboratorio de la asignatura "Ampliación de Química Física" de segundo ciclo de Química (especialidad Fundamental).

ASPECTOS TEORICOS

Consideremos la pila:

(-) $Zn(s)/ZnSO_4(m_1)/Hg_2SO_4(s)/Hg(l)/Hg_2SO_4(s)/ZnSO_4(m_2)/Zn(s)$ (+)

siendo $m_2 > m_1$.

Las reacciones en los electrodos son:

$$Zn(s) \longrightarrow Zn^{2+}\ (m_1) + 2e$$

$$2e + Hg_2SO_4(s) \longrightarrow 2Hg(1) + SO_4^{=}\ (m_1)$$

$$2\ Hg(1) + SO_4^{=}\ (m_2) \longrightarrow 2e + Hg_2SO_4(s)$$

$$Zn^{2+}(m_2) + 2e \longrightarrow Zn(s)$$

---

$$Zn^{2+}\ (m_2) + SO_4^{=}\ (m_2) \longrightarrow Zn^{2+}\ (m_1) + SO_4^{=}\ (m_1) \qquad (1)$$

De acuerdo con la ecuación de Nernst, el potencial de la pila en el equilibrio viene dado por:

$$E = \frac{\beta}{2} \log \frac{a_{ZnSO_4}(m_2)}{a_{ZnSO_4}(m_1)} \qquad (2)$$

Para un electrólito 2:2 se cumple que:

$$a = a_{\pm}^2 = \gamma_{\pm}^2\ m_{\pm}^2 = \gamma_{\pm}^2\ m^2$$

y la ecuación (2) puede ponerse de la forma:

$$E = \beta \log \frac{m_2 \gamma_{\pm}(2)}{m_1 \gamma_{\pm}(1)} \qquad (3)$$

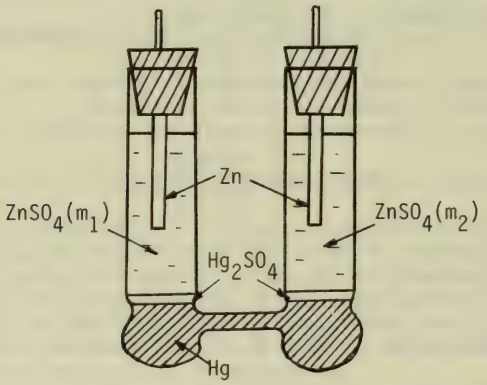
El coeficiente de actividad de la disolución mas diluida, $\gamma_{\pm}(1)$ puede conocerse haciendo uso de alguna ecuación teórica, siempre que la concentración $m_1$ esté dentro del rango de validez atribuido a dicha ecuación. A partir de la relación (3) y del valor de $\gamma_{\pm}(1)$, los coeficientes de actividad de disoluciones mas concentradas, que $m_1$ pueden determinarse por medidas de f.e.m. de las correspondientes pilas.

PARTE EXPERIMENTAL

Por pesada directa se preparan disoluciones acuosas de $ZnSO_4$ de concentraciones 0.01, 0.1, 0.2, 0.5 y 1.0 m, el contenido en cinc de las cuales se determina por vía electrolítica[5] .

El $Hg_2SO_4$ se prepara a partir de nitrato mercuriosos obtenido mezclando 20 gr de Hg con 3 ml de $HNO_3$ concentrado. Cuando la reacción se ha completado se mezcla todo con 40 ml de $HNO_3$ diluido (1:40) y caliente. La disolución resultante se filtra y se deja caer lentamente en forma de un fino chorro sobre 200 ml de $H_2SO_4$ (1:3) caliente a los que se han añadido un poco de Hg. El $Hg_2SO_4$ se lava varias veces por decantación con $H_2SO_4$ 0.1 N, se filtra y se seca a vacío. Antes de usarlo se mezcla en un mortero con un poco de mercurio.

Se preparan cuatro pilas dobles como la esquematizada en la figura:




Sobre un lecho de mercurio, que impide la conexión entre ambos brazos de la célula de vidrio, se deposita una fina capa de $Hg_2SO_4(s)$. El brazo de la izquierda se llena en todos los casos con la disolución mas diluida y el de la derecha con cada una de las cuatro diferentes disoluciones a las que se van a medir los coeficientes de actividad. La pila se completa con dos electrodos de Zn, consistentes en láminas de cinc electrolítico, ensartadas en sendos tapones de corcho o goma. Antes de introducirlos en la

célula, los electrodos de cinc deben activarse ,para lo cual, se lijan suavemente, se meten unos instantes en disolución diluida de sulfurico, se lavan con agua y se secan.

Construidas las pilas se introducen en un termostato a 25ºC y, alcanzado el equilibrio térmico, se miden sus potenciales con precisión de $\pm 0.1$ mV. Las medida se repiten a intervalos de 5 minutos hasta conseguir lecturas estables.

RESULTADOS

El coeficiente de actividad de la disolución 0.01 m de $ZnSO_4$ se obtiene a partir de la ecuación de Bromley[6] :

$$\log \quad = - \frac{A \, |Z_+ \, Z_-| \sqrt{I}}{1 + a\sqrt{I}} + \frac{(0.06 + 0.6B) \, |Z_+ \, Z_-|}{\left(1 + \frac{1.5}{|Z_+ \, Z_-|} I\right)^2} I + BI$$

siendo $A = -0.511 \ Kg^{1/2}.mol$ (a 25ºC)

$a = 1.0$ (para electrólitos 1:1, 2:1, 1:2, 2:2 y 3:2)

$B = -0.0240$ Kg/mol

La elección de la ecuación de Bromley obedece a dos razones: es muy cómoda de usar (para electrólitos 2:2 tiene un solo parametro ajustable) y es válida para concentraciones muy superiores a la 0.01m lo que asegura un cálculo correcto del coeficiente de actividad de esta disolución sin necesidad de recurrir a ecuaciones mas elaboradas que implican mas parametros.

En la Tabla se recogen, para los distintos valores de $m_2$ , los potenciales de las pilas y los coeficientes de actividad obtenidos haciendo uso de la ecuación (4) y valores bibliográficos de los mismos dados por Robinson y Stokes.[7]

TABLA

| $c_{ZnSO_4}$ m | E (mV) | $\gamma_{\pm}$(obt.) | $\gamma_{\pm}$(bibl.) |
|---|---|---|---|
| 0.1 | 30.0 | 0.14 | 0.150 |
| 0.2 | 38.5 | 0.10 | 0.104 |
| 0.5 | 48.6 | 0.06 | 0.0630 |
| 1.0 | 57.6 | 0.04 | 0.043 |

La bondad de los datos que proporciona la pila doble se pone de manifiesto al compararlos con los obtenidos por otros métodos y que aparecen en la última columna de la Tabla.

BIBLIOGRAFIA


1.- Kortum, G. y Bockris, J.O'M. Textbook of Electrochemistry (Vol I).; Elsevier Publishing Company: New York, 1951, p 267.

2.- Rock, P.A.; J. Chem. Educ. 47, 683-686, (1970).
Rock, P.A.; J. Chem. Educ. 52, 787-789, (1975).

3.- Pytkowicz, R. Activity coefficients in electrolyte solutions; CRC Press Inc.: Boca Ratón (Florida), 1979, p 84 y sigs.

4.- Glasstone, S. An introduction to Electrochemistry; D. Van Nostrand Company Inc.: New York, 1949, p 304 y sigs.

5.- Treadwell, F.P. Tratado de Química Analítiva; M. Marín Ed.: Barcelona, 1945, p 123 y sigs.

6.- Bromley, L.A. AIChE Journal 19, 313-320, (1973).

7.- Robinson R.A. and Stokes R.H. Electrolyte Solutions; Butterworths Scientifics Publications: London, 1959, p 502.

Rev.Acad.Canar.Cienc., II, 15 - 22 (1990)

# POTENCIAL DE UNION LIQUIDA ENTRE DOS DIFERENTES ELECTROLITOS UNIVALENTES, CON UN ION COMUN, A LA MISMA CONCENTRACION.

J. Morales, P. Esparza y A. Arévalo,

Departamento de Química Física

Universidad de La Laguna, (Tenerife)

SUMMARY.- A system is described for the calculation and indirect measurement of liquid junction potenctial between two different univalent electrolyte both at same concentration, with one ion in common.

RESUMEN.- Se describe un sistema para el cálculo y la medida indirecta del potencial de unión líquida que aparece al poner en contacto dos disoluciones de electrólitos univalentes, diferentes, con un ión común ambas a la misma concentración.

## INTRODUCCION

Debido a las distintas movilidades de los iones, siempre que a través de una interfase se pongan en contacto dos disoluciones diferentes, se producirá una separación de cargas que crearán una diferencia de potencial que se conoce como potencial de difusión o potencial de unión de líquidos, $E_j$ .

Cuando se trabaja con pilas con dos, o mas electrólitos, los potenciales de difusión constituyen una dificultad, de ordinario, dificil de soslayar, al menos que se trate de una pila doble o pila de concentración sin transporte.

En muchos casos es posible minimizar el efecto del potencial de difusión, haciendo uso de puentes salinos, pero en otros mu-

chos experimentos electroquímicos, esto no puede hacerse y existe la incertidumbre de un potencial de difusión cuyo valor, a priori, se desconoce.

La presente experiencia se centra en la medida y posterior cálculo teórico de coeficientes de difusión entre dos diferentes electrólitos univalentes, con un ión común, a la misma concentración, con vistas a iniciar en la obtención de estos datos de tanto interés en la electroquímica.

ASPECTOS TEORICOS

La medida potenciométrica directa de un potencial de difusión no puede realizarse, puesto que es imposible medir el potencial de un solo electrodo. Por tanto, no se puede asignar, sin ambigüedad, la fracción del potencial total de una célula con unión líquida que se debe al potencial de difusión. Sin embargo, en el caso de uniones entre dos disoluciones diluidas de un mismo electrólito 1:1, los valores calculados parecen ser bastante exactos, independientemente de la forma en que se realice el contacto.

La ecuación básica que relaciona el potencial de difusión $E_j$ con los números de transporte, $t_i$, los valores algebraicos de las cargas, $z_i$ y las actividades $a_i$ de los iones que forman la unión es:

$$E_j = -\frac{RT}{F}\int_1^2 \sum_n \frac{t_i}{z_i}\, d \ln a_i \qquad (1)$$

donde n indica que el sumatorio se extiende a los diferentes tipos de iones presentes. La ecuación anterior se obtiene a partir

de aproximaciones termodinámicas y difusivas[1], y en ella está implícito que el transporte del disolvente, a traves de los iones solvatados, es despreciable.

Para llevar a cabo la integración de la ecuación (1) es preciso conocer como varía la concentración de cada ión a través de la región de transición, así como también, la dependencia de los coeficientes de actividad y los números de transporte con la concentración $c_i$ de los iones.

Debido a su dificultad, el caso general no puede resolverse analíticamente, si bién puede obtenerse una solución aceptando que en la zona de difusión los coeficientes de actividad de los iones son iguales y que, en dicha zona, la concentración de cada ión varía linealmente entre los valores de concentración $c_1$ y $c_2$ que tienen los iones en las disoluciones de cada electrodo, o dicho de otra manera, que el gradiente de concentración en la zona de contacto es lineal. En base a estas simplificaciones Henderson obtuvo que

$$E_j = - \frac{RT}{F} \frac{\sum u(c_2 - c_1)}{\sum uz(c_2 - c_1)} \ln \frac{\sum uzc_2}{\sum uzc_1} \qquad (2)$$

donde u es la movilidad ionica $\left[cm^2\ seg^{-1}\ V^{-1}\right]$ y z la valencia del ión.

Sea la siguiente pila con unión de líquidos:

$$\underset{E_1}{Ag/AgCl,\ M_1Cl\ (c_1)} \ :\ \underset{E_j}{M_2Cl(c_2),\ AgCl/Ag} \qquad (3)$$

donde $M_1$ y $M_2$ son dos cationes univalentes diferentes.

Definiendo $E_p$ , potencial de la pila, como el potencial del semi-electrodo de la derecha, $E_2$ , medido con respecto al semi-electrodo de la izquierda, $E_1$ , puede escribirse que:

$$E_p = E_2 - E_1 + E_j$$

Como quiera que los potenciales reversibles de las semi-pilas pueden calcularse, para cada semi-reacción:

$$AgCl + e \longrightarrow Ag + Cl^-$$

a partir de la ecuación de Nernst:

$$E = E^o_{AgCl/Ag} - \frac{RT}{F} \ln a_{Cl^-}$$

el potencial de la pila puede escribirse como:

$$E_p = - \frac{RT}{F} \ln \frac{a_{Cl^-_2}}{a_{Cl^-_1}} + E_j \qquad (4)$$

Evidencias experimentales citadas por Rock[3] indican que, solo es posible hacer una estimación del potencial de unión de líquidos, entre electrólitos diferentes, con precisión de $\pm 1$ mV, cuando se cumplen las siguientes condiciones:

a) La unión debe estar formada por sales del mismo tipo que tengan un ión común.

b) El disolvente ha de ser el mismo y la concentración de ambas disoluciones debe ser inferior a 0.1 M, y

c) El número de transporte de los iones no comunes no ha de ser muy diferente.

Para uniones entre electrólitos univalentes a la misma concentración, como es el caso de la pila (3), la ecuación de Henderson se reduce a ,

$$E = -\frac{RT}{F} \ln \frac{u_{M_2^+} + u_{Cl^-}}{u_{M_1^+} + u_{Cl^-}} = -\frac{RT}{F} \ln \frac{\Lambda_{M_2Cl}}{\Lambda_{M_1Cl}} \quad (5)$$

que se conoce como ecuación de Lewis-Sargent

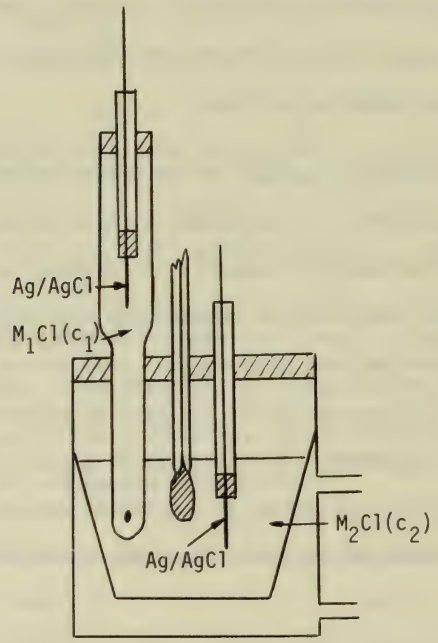
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se construyen pilas del tipo de la (3), utilizando como parejas de electrólitos KCl:NaCl, KCl:LiCl y NaCl:LiCl siendo en todos los casos $c_1 = c_2 = 0.1M$. Los tres electrólitos cumplen las condiciones impuestas por Rock.

Los electrodos Ag/AgCl se han preparado por vía electrolítica. Como soporte se ha utilizado un hilo de Ag de 1 mm de diametro y 2 cm de longitud soldado a un alambre de cobre. El aislamiento del cobre y de la soldadura se hace con un tubo de vidrio de pared fina sellado con Poxipol. Como electrólito se ha usado HCl 0.1 M. El cátodo fué un cilindro de malla de platino, colocandose, axialmente, el electrodo de plata. La electrolisis se realizado a una intensidad de 0.4 $mA/cm^2$ durante 30 minutos. Confrontados entre sí los electrodos dieron una diferencia de potencial de $\pm$ 0.1 mV.

Los productos utilizados (HCl, KCl, NaCl y LiCl) fueron todos de calidad Merck p.a. sin ulteriores purificaciones. El agua fué bidestilada.

Las pilas se construyeron según se esquematiza en la figura. En una célula Metrohm, con doble camisa a efectos de termostatado y tapa con bocas normalizadas, se dispone una de las disoluciones, la otra se coloca en una camisa Ingold en cuyo extremo hay un contacto de porcelana porosa a traves del cual se realiza la unión salina. En una de las bocas de la célula y en el extremo de la camisa se colocan sendos electrodos de Ag/AgCl, poniendose en otra de las bocas un termómetro en décimas. Todas la medidas se han realizado termostatando a 25.0ºC




Alcanzado el equilibrio térmico (aproximadamente 30 minutos) se procede a medir el potencial de la pila, a intervalos de cinco minutos, hasta la obtención de un valor constante. La medida del

potencial se realizó haciendo uso de un multimetro digital Keithley mod. 191.

Dado que los coeficientes de actividad de las disoluciones 0.1M de LiCl, NaCl y KCl que aparecen en la bibliografía[5] ,son, respectivamente, 0.773, 0.787 y 0.791, los términos logaritmicos de la ecuación (4) prácticamente se anulan y los potenciales medidos de las pilas coinciden con los potenciales de unión de líquidos. En la primera columna de la Tabla I se recogen los resultados obtenidos.

TABLA I

| Concentración/ M | Unión | $E_j$ /mV (medido) | $E_j$ /mV (calculado) |
|---|---|---|---|
| 0.1 | KCl:NaCl | 6.2 | 6.0 |
| | KCl:LiCl | 8.7 | 7.5 |
| | NaCl:LiCl | 2.5 | 1.5 |

A fin de poder realizar el cálculo teórico de los potenciales de unión de líquidos, se procede a determinar las conductividades específicas de las distintas disoluciones electrolíticas, haciendo uso de un conductometro Radiometer CDM 80. Los resultados se recogen en la Tabla II.

TABLA II

| Concentración/M | Electrólito | $\varkappa$/mS.cm | $\Lambda$ /cm $.\Omega^{-1}.eq^{-1}$ |
|---|---|---|---|
| 0.1 | LiCl | 9.5 | 95 |
| | NaCl | 10.3 | 103 |
| | KCl | 13.0 | 130 |

En la primera columna aparecen las conductividades específicas en mS/cm proporcionadas directamente por el aparato y en la segunda las conductividades específicas en $cm^2.\Omega^{-1}.eq^{-1}$, que están en buena concordancia con datos bibliográficos[6] . A partir de estas conductividades equivalentes y haciendo uso de la ecuación de Lewis-Sargent se determinan los $E_j$ (calculados) que aparecen en la segunda columna de la Tabla I.

A concentración 0.1 M, los números de transporte de los iones $Li^+$, $Na^+$ y $K^+$ recogidos en la bibliografía[7] son, respectivamente, 0.316, 0.385 y 0.490. La mayor diferencia en los números de transporte de los iones $K^+$ y $Li^+$ explica que el sistema formado por KCl:LiCl presente el mayor potencial de difusión. Por el contrario, el sistema NaCl:LiCl tiene el menor potencial de difusión debido a la mayor similitud entre los números de transporte de los iones $Na^+$ y $Li^+$.

BIBLIOGRAFIA


1.- Bard, J. A., Faulkner L. R., Electrochemical Methods Fundamentals and Applications. John Wiley & Sons. New York 1980, pag. 624 y sig.

2.- Hendersons, P., Z. Physik. Chem., 1907, 59, 118.

3.- Rock, P. A., Electrochim. Acta 1967, 12, 1531.

4.- Lewis G.N., Sargent L. W., J. Am. Chem. Soc., 1909, 31, 363.

5.- Robinson R. A., Stokes, R. H., Electrolyte Solutions, Butterworths Scientifics Publications, London, 1959, pag. 491.

6.- Harned H. S., Owen B. B., The Physical Chemistry of Electrolytic solutions, Reinhold Publishing Corporatio, New York, 1958, pag. 697.

7.- Referencia 5, pag. 158

Rev.Acad.Canar.Cienc., II, 23 - 31 (1990)

# EL 2-(4',5'-DIFENIL-2'-IMIDAZOLILAZO)-4-CLOROFENOL COMO REACTIVO CROMOGENICO E INDICADOR METALOCROMICO PARA COBRE(II)

Argelio González, Vicente Ojeda, Venerando González.

Departamento de Química Analítica, Bromatología y Toxicología. Universidad de La Laguna. 38204 - Tenerife. España.

ABSTRACT

In a 50% (V/V) ethanol-water medium at I = 0.1M $NaClO_4$, Cu (II) and 2-(4',5'-diphenyl-2'-imidazolylazo)-4-chlorophenol form the complexes $CuHR^+$($log\beta_{111}$ = 8.96 ± 0.16) and $CuH_3R_2^+$ ($log\beta_{132}$ = 14.79 ± 0.10). The latter conforms to Beer's law between 0.10 and 3.0 ppm Cu at pH 3.5 with molat absorptivity of $1.93x10^4$ $l.mol^{-1}.cm^{-1}$ at 610 nm. And point sharpness, titration errors and pH ranges are theoretically established for the use of that reagent as metallochromic indicator for copper, results are checked experimentally.

KEYWORDS: *Copper(II);2-(4',5'-diphenyl-2'-imidazolylazo)-4-chlorophenol; spectrophotometry; complexation equilibria; metallochromic indicator.*

## INTRODUCCION

Entre los componentes heteroazoicos, los derivados del núcleo imidazol han sido escasamente estudiados como reactivos analíticos. Así Yamauchi *et al.* (1-5), Mattison *et al.* (6) y Shibata *et al.* (7,8) han sintetizado algunos derivados azoicos del 4,5-difenilimidazol utilizándolos como reactivos cromogénicos y/o indicadores metalocrómicos de iones inorgánicos.

En la publicación anterior (9) se ha dado cuenta de la síntesis del 2-(4',5'-difenil-2'-imidazolilazo)-4-clorofenol, 4CL-DFIAF, del que se ha estudiado sus equilibrios ácido-base y de complejación con vanadio (V).

En el presente trabajo se da cuenta de los estudios espectrofotométricos realizados en el sistema cobre(II)/4Cl-DFIAF, estableciéndose la posibilidad de utilizar este reactivo para la determinación espectrofotométrica y como indicador metalocrómico de cobre (II).

## PARTE EXPERIMENTAL

### Aparatos

Se han descrito anteriormente (9).

Reactivos

Disolución $10^{-3}$M de 4Cl-DFIAF (9) en etanol absoluto. Disolución estándar $10^{-2}$M de EDTA. Disolución estándar $10^{-1}$M de Cu(II) preparada a partir de CuO y $HClO_4$ y valorada complexométricamente. Disoluciones reguladoras ácido acético-acetato sódico, ácido monocloracético-monocloracetato sódico y amoníaco-perclorato amónico preparadas en la forma usual.

Todos los reactivos utilizados son de calidad analítica y el agua desionizada. Los valores de pH en el medio etanólico empleado no han sido corregidos.

Determinación espectrofotométrica de cobre

A la muestra conteniendo 2,5-75 µg de cobre, en un matraz aforado de 25 ml, se añaden 5 ml de disolución etanólica $10^{-3}$M de 4Cl-DFIAF, 1ml de $NaClO_4$ 2,5M, 5 ml de disolución reguladora de ácido monocloracético-monocloracetato sódico de pH 3,5, 7,5 ml de etanol y se enrasa con agua desionizada. Al cabo de 15 minutos se mide la absorbancia a 610 nm frente a un blanco preparado de forma similar pero que no contiene cobre.

Determinación complexométrica de cobre con 4Cl-DFIAF como indicador metalocrómico

A la disolución problema de cobre se le añaden 2 ml de disolución reguladora de ácido acético-acetato sódico de pH 5,4, 5-6 gotas de disolución etanólica $10^{-3}$M de 4Cl-DFIAF y agua desionizada hasta completar unos 25-30 ml. La valoración se lleva a cabo por adición de disolución estandar $10^{-2}$M de EDTA hasta cambio del color azul del complejo al amarillo correspondiente al reactivo libre.

## RESULTADOS Y DISCUSION

Equilibrios de complejación en el sistema Cu(II)/4Cl-DFIAF

Debido a la insolubilidad de los complejos formados en este sistema, los estudios espectrofotométricos se han realizado en un medio 50%(V/V) etanol-agua a I = 0,1M en perclorato sódico, condiciones en las que el reactivo presenta $pK_{a1}$ = 2,28 ± 0,08, $pK_{a2}$ = 8,14 ± 0,06 y $pK_{a3}$ = 13,00 ± 0,14 (9).

En los espectros de absorción en función del pH de disoluciones equimolares de Cu(II) y 4Cl-DFIAF, se observa a pH 2-4 la aparición de una banda de absorción a 575-625 nm que coexiste con el máximo de absorción correspondiente al reactivo libre a esos pHs, y un punto isosbéstico a 515 nm, mientras que a pH > 4

se define perfectamente un máximo a 610 nm y un nuevo punto isosbéstico a 505 nm.

Las curvas de absorbancia-pH, Fig. 1, para disoluciones con $C_{Cu}/C_R \geq 1$ indican que el proceso de complejación comienza a pH $\geq$ 1,5, formándose una especie compleja estable a pH 4-5. Sin embargo, las curvas obtenidas para disoluciones en que $C_{Cu}/C_R = 1/10$ presentan dos tramos perfertamente definidos. Uno a $1,5 \leq pH \leq 3,0$, coincidente con el de las curvas realizadas en exceso de ion cobre, y un segundo tramo peor definido que el anterior a pH $\geq$ 4,5. Todo ello indica la formación de, al menos, dos especies complejas.

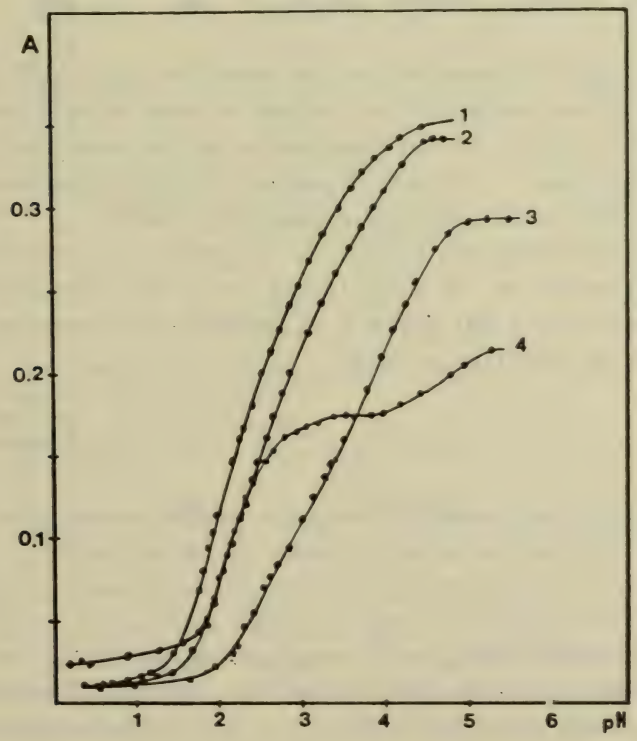



Figura 1.- Curvas absorbancia-pH para el sistema Cu(II)/4Cl-DFIAF, 50%(V/V) etanol-agua, I = 0,1M $NaClO_4$, 610 nm: $C_R$ = $2x10^{-5}$M, $C_{Cu}$= 1)$6x10^{-4}$M; 2) $2x10^{-4}$M; 3) $2x10^{-5}$M; 4) $C_R = 1x10^{-4}$M, $C_{Cu} = 1x10^{-5}$M.

La determinación de las estequiometrías a pH 3,5 y 5,9, y 610 nm, por el método de las variaciones contínuas, indica la formación de un complejo 1:2, Cu:R. Sin embargo, por el método de la relación molar se encuentran estequometrías 1:1 y 1:2, Cu:R. El que en algunos casos se encuentren puntos de corte para Cu:R = 1,5 parece indicar un equilibrio lábil entre estos dos complejos.

De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta los valores de $pK_{a1}$ y $pK_{a2}$ del reactivo, podemos admitir los siguientes equilibrios de complejación:

$$Cu^{2+} + mH_2R \overset{K_{1xm}}{=\!=\!=} CuH_xR_m + nH^+ \qquad (A)$$

$$Cu^{2+} + mH'_3R^+ \overset{K_{1ym}}{=\!=\!=} CuH_yR_m + qH^+ \qquad (B)$$

con la posible intervención de las especies $H_2R$ y $H_3R^+$ del reactivo para originar complejos en los que m toma valores uno o dos.

Para el cálculo de las constantes de los equilibrios anteriores se ha aplicado el método de análisis gráfico de Sommer *et al.* (10) adaptado a nuestras condiciones de trabajo.

a) Disoluciones con exceso de ion metálico.- Teniendo en cuenta las constantes de los equilibrios (A) y (B), los balances de masa del reactivo y del cobre y el balance de absorbancia, se obtienen para el equilibrio (A):

$$C_R/A = m/\varepsilon_c + |(AZ - C_R\bar{\varepsilon}_R)(Z\varepsilon_c - m\bar{\varepsilon}_R)^{m-1}|H^+|^n/C_{Cu}K_{1xm}|^{1/m}/A\varepsilon_c \quad |I|$$

$$\log|(AZ - C_R\bar{\varepsilon}_R)(Z\varepsilon_c - m\bar{\varepsilon}_R)^{m-1}/(C_R\varepsilon_c - mA)^m| = \log K_{1xm} + \log C_{Cu} + npH \quad |II|$$

siendo $Z = 1 + (|H^+|/K_{a1})$; $\bar{\varepsilon}_R = \varepsilon_{H_2R} + (\varepsilon_{H_3R}|H^+|/K_{a1})$ y $\varepsilon_c$ la absortividad molar de la especie compleja formada. Cuando en las ecuaciones anteriores se hace m = 1,, se convierte en |IA| y |IIA|, y cuando m = 2 se obtendrán las |IIIA| y |IVA|.

De igual forma para el equilibrio (B) se obtendrán las expresiones |IB| a |IVB|, en las que en lugar de Z aparecerá $Z' = 1 + (K_{a1}/|H^+|)$, $\bar{\varepsilon}_R$ se sustituirá por $\bar{\varepsilon}'_R = \varepsilon_{H_2R} + \varepsilon_{H_3R}K_{a1}/|H^+|)$ y n por q.

Para las disoluciones que contienen exceso de ion metálico,

TABLA I

Valores de las constantes de equilibrio y absortividades molares de los equilibrios de complejación en el sistema Cu (II)/4Cl-DFIAF 50%(V/V) etanol-agua, I = 0,1M $NaClO_4$, 610 nm.

| $C_{Cu}/C_R$ | Ecuación utilizada | n ó q | $\epsilon_c x10^{-4}$# | logK |
|---|---|---|---|---|
| | | | | $logK^A_{111}$ |
| 30/1 | IIA | 0,95* | | 0,82 |
| " | IA | 1** | 1,64 | 0,84 |
| 10/1 | IIA | 0,92* | | 0,96 |
| " | IA | 1* | 1,70 | 0,75 |
| | | | | $logK^B_{111}$ |
| 30/1 | IIB | 2,0* | | -1,45 |
| " | IB | 2** | 1,62 | -1,40 |
| 10/1 | IIB | 1,92* | | -1,31 |
| " | IB | 2** | 1,71 | -1,58 |
| | | | | $logK^A_{132}$ |
| 1/10 | VIA | 1,05* | | 6,61 |
| " | VA | 1** | 1,72 | 6,60 |
| | | | | $logK^B_{132}$ |
| " | VIB | 3,05* | | 2,05 |
| " | VB | 3** | 1,72 | 2,19 |

# Valor calculado, en $l.mol^{-1}.cm^{-1}$
* Valor calculado
** Valor supuesto

sólo se obtienen resultados concordantes cuando m = 1, es decir, suponiendo la formación de un complejo de estequimetría 1:1. Asímismo, según se observa en la Tabla I, la ecuación |IIA| muestra la liberación de un protón, mientras que la |IIB| pone de manifiesto la liberación de dos protones. Por tanto, podemos admitir que, en estas disoluciones, el Cu(II) y el 4Cl-DFIAF reaccionan según los equilibrios,

$$Cu^{2+} + H_2R \overset{K^A_{111}}{=\!=\!=} CuHR^+ + H^+$$

$$Cu^{2+} + H_3R^+ \overset{K^B_{111}}{=\!=\!=} CuHR^+ + 2H^+$$

para dar origen a una misma especie compleja, $CuHR^+$, con una ab-

sortividad molar media calculada de $1,67 \times 10^4$ $l.mol^{-1}.cm^{-1}$ ($1,72 \times 10^4$, experimental), y $\log K^A_{111} = 0,84 \pm 0,10$ y $\log K^B_{111} = -1,44 \pm 0,13$, como valores medios.

b) Disoluciones en exceso de ligando.- Para los equilibrios (A) y (B) antes propuestos y mediante consideraciones similares a las planteadas en el apartado a), se deduce que

$$C_{Cu}/\Delta A = (1/\epsilon_c) + (|H^+|^n z^m / C^m_{Cu} \epsilon_c K_{1xm} \qquad |VA|$$

$$\log|z^m \Delta A/(C_{Cu}\epsilon_c - \Delta A)| = \log K_{1xm} + m \log C_R + npH \qquad |VIA|$$

en las que $\Delta A$ representa la diferencia entre las absorbancias del complejo y del reactivo libre, en iguales condiciones. Para el equilibrio (B) se obtendrán las ecuaciones |VB| y |VIB| con los mismos cambios respecto de |VA| y |VIA| que anteriormente.

La aplicación de estas ecuaciones al primer tramo de las curvas A-pH obtenidas de disoluciones en las que $C_{Cu}/C_R = 1/10$, en la zona $1,5 \leq pH \leq 3,0$, sólo conduce a resultados concordantes cuando m = 2. Por tanto, en estas disoluciones, las posibles reacciones entre Cu(II) y 4Cl-DFIAF serían:

$$Cu^{2+} + 2H_2R \overset{K^A_{132}}{=\!=\!=} CuH_3R_2^+ + H^+$$

$$Cu^{2+} + 2H_3R^+ \overset{K^B_{132}}{=\!=\!=} CuH_3R_2^+ + 3H^+$$

de acuerdo con el número de protones liberados según la Tabla I, resultando $\log K^A_{132} = 6,61$, $\log K^B_{132} = 2,12$ y $\epsilon_c = 1,72 \times 10^4 l.mol^{-1}.cm^{-1}$, como valores medios.

Al comentar las curvas A-pH en exceso de reactivo habíamos dicho que a pH > 4 aparece una nueva especie compleja, posiblemente por pérdida del protón hidroxílico de la molécula de ligando según

$$CuH_3R_2^+ \text{ ==== } CuH_2R_2 + H^+$$

sin que hayamos podido realizar los cálculos correspondientes debido a la pequeña variación de absorbancia en el mismo ($\simeq 0,035$ unidades) y por la relativa insolubilidad de la especie formada que origina turbidez en las disoluciones.

A partir de las constantes calculadas para los diferentes equilibrios y los valores de $pK_a$ del reactivo se calculan las si-

guientes constantes de estabilidad: $\log \beta_{111} = 8,98 \pm 0,16$ para $CuHR^+$ y $\log \beta_{132} = 14,79 \pm 0,10$ para $CuH_3R_2^+$, como valores medios.

Determinación espectrofotométrica de cobre con 4Cl-DFIAF.

El complejo $CuH_3R_2^+$ a pH 3,5 (ac. monocloracético/monocloracetato sódico) cumple la ley de Beer entre 0,10 y 3,0 ppm de Cu, con una absortividad molar de $1,93 \times 10^4$ $l.mol^{-1}.cm^{-1}$ a 610 nm y 0,60-2,0 ppm de Cu como zona óptima para las determinaciones, según el correspondiente gráfico de Ringbom. El estudio estadístico realizado sobre diez muestras conteniendo 1,25 ppm de cobre, cada una, indica el error relativo de $\pm 0,44\%$ ($P = 0,05$).

Las máximas interferencias al método corresponden a los iones Ti(IV), V(V), Pd(II), Co(II), Ni(II), Hg(II), Fe(II,III) y Bi(III). Otros iones como U(VI), Ga(III), In(III), Pb(II), Zr(IV) y citrato pueden estar presentes hasta una relación 1/1 respecto del cobre presente; Zn(II) y Mn(II) hasta relaciones $C_x/C_{Cu} = 10$; Cd(II), Sb(III) y Sn(II) hasta 20 veces; Cr(III) hasta 30 veces; Al(III) hasta 50 veces y alcalino-térreos, As(III), Mo(VI), fosfatos, haluros y tartratos hasta más de 100 veces. La presencia de tartrato como agente enmascarante permite aumentar el nivel de tolerancia de algunos iones, así Cd(II) hasta 50; Ga(III) y Sb(III) hasta 10 y Al(III) hasta 100 veces la concentración presente de cobre.

El 4Cl-DFIAF como indicador metalocrómico de cobre(II).

Conocidas las reacciones que el Cu(II) origina con el 4Cl-DFIAF y la diferencia que existe entre los colores que presentan el reactivo (amarillo) y los complejos (azul), se ha procedido a establecer las condiciones experimentales óptimas para la utilización de este reactivo como indicador metalocrómico de cobre.

Las previsiones teóricas para determinar el intervalo de pH al cual se obtiene un punto final bien definido y un error de valoración mínimo, se han realizado mediante la utilización de las ecuaciones establecidas por Yamauchi *et al.* (5) con algunas modificaciones (11) introducidas para tener en cuenta las reacciones laterales asociadas a la utilización de disoluciones reguladoras de pH.

La aplicación de dichas ecuaciones a valoraciones realizadas con: $C_{Cu} = 2 \times 10^{-2}M$, $C_R = 2 \times 10^{-5}M$, $C_{HAc} = 0,1M$ y $C_{EDTA} = 10^{-2}M$, conduce a las variaciones de la fracción de indicador no complejado con el Cu(II), $y = |R|/C_R$, con la fracción valorada, $X = C_{EDTA}/C_{Cu}$, representadas en la figura 2, así como a las variaciones de

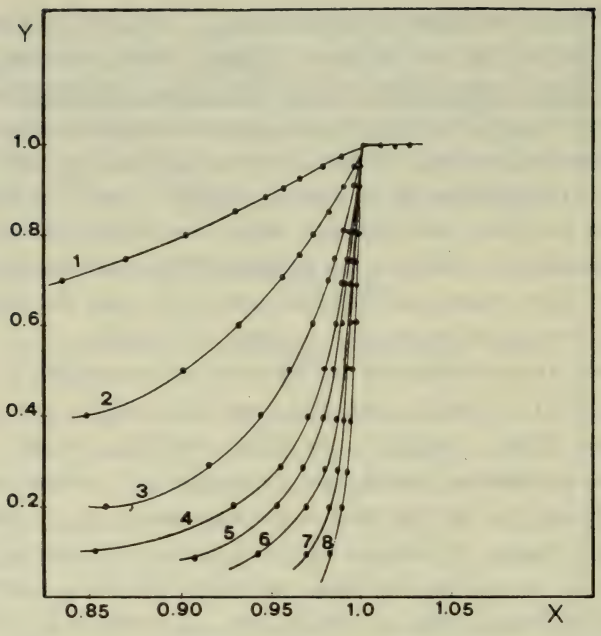



Figura 2.- Curvas de cambio de color. pH = 1) 2,5, 2)3,0, 3) 3,5, 4) 4,0, 5) 4,5, 6) 5,0, 7) 5,5, 8) 6,0.

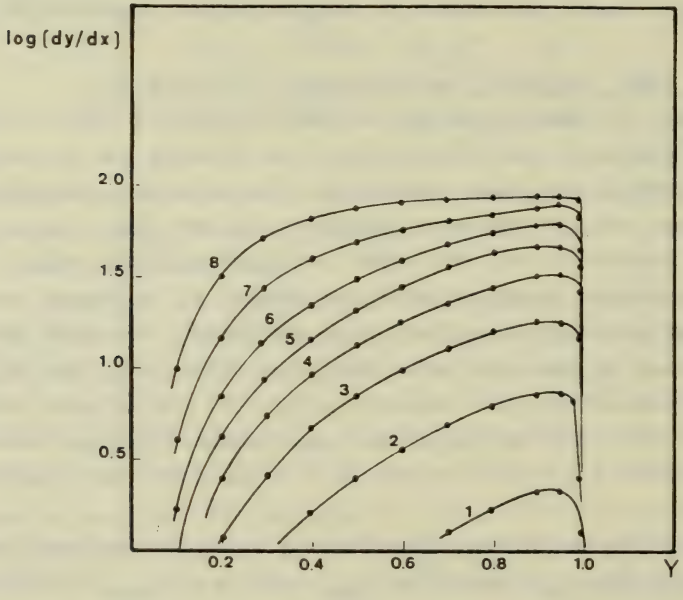



Figura 3.- Variación del índice de nitidez en función de la fracción de indicador libre. pH = 1) 2,5, 2) 3.0 3) 3,5 4) 4,0, 5) 4,5, 6) 5,0, 7) 5,5, 8) 6,0.

log(dY/dX) vs X, agrupadas en la fig. 3.

En general, puede admitirse (12) como punto final teórico aquel en que para y = 0,8, se obtienen valores de X = 0,99-1,00; y que los virajes son suficientemente netos cuando para Y = 0,8 se alcanzan valores de log(dY/dX) > 1,40. En las condiciones experimentales preestablecidas, ambas condiciones se alcanzan para pH > 4,0-4,5. Para pH > 4,5 los errores teóricos calculados resultan inferiores a 0,45%.

Experimentalmente se han realizado valoraciones complexométricas de Cu(II) a pH = 5,4 (acético/acetato) con 4Cl-DFIAF como indicador, estableciendo el punto final visualmente. Los resultados obtenidos indican que se pueden valorar cantidades del orden de 0,95 -3,18 mg de cobre con errores relativos inferiores al ± 2%.

REFERENCES


(1) Yamauchi, O, Tanaka, H y Uno, T.: Chem. Pharm. Bull. (Japón), 14, 948 (1966).

(2) ibid: 14, 952 (1966).

(3) ibid: 15, 1453 (1967).

(4) ibid: Talanta, 15, 177 (1968).

(5) ibid: 15, 459 (1968).

(6) Mattison, L.E., Metaxas, J.M., y O'Dell, C.S.: Anal. Chem., 41, 1690 (1969).

(7) Shibata, S., Furukawa, M. y Nakashima, R.: Anal. Chim. Acta, 81, 131 (1976).

(8) Miwa, S., Furulawa, M. y Shibata, S.: Anal. Chim. Acta, 120, 495 (1980).

(9) González, A., González, V. y García Montelongo, F.: Quim. Anal. 6,224 (1987).

(10) Mushran, S.P. y Sommer, L.: Coll. Czech., Chem. Commun., 34 3693 (1968).

(11) González, V., Afonso, A. y García Montelongo, F.: An. Quim., 80B, 88 (1984).

(12) Tanaka, M. y Nakagawa, G.: Anal. Chim. Acta, 29, 123 (1969).

Rev.Acad.Canar.Cienc., II, 33 - 68 (1990)

# EFECTOS QUIMICOS DE LA DESCARGA DE ALTA FRECUENCIA. SINTESIS Y CARACTERIZACION DE UN NUEVO ORTOPERIODATO DE COBRE(II).

Benito Rodríguez Ríos*, Alfredo Mederos, Pedro Gili, Francisco González Regalado y Antonio Isidro Hernández Hernández**.
Departamento de Química Inorgánica. Universidad de La Laguna.
Tenerife. Islas Canarias. España.

ABSTRACT

In the present work, it is studied the effects produced by a high frequency discharge, on aqueous solutions of inorganica compounds in differents experimental conditions.

## INTRODUCCION

La acción de la corriente de alta frecuencia (A.F.) sobre disoluciones de electrolitos fué estudiado por Beltrán Martínez y Rodríguez Ríos (1), haciendo saltar la descarga producida entre un electrodo situado fuera de la disolución acuosa, mientras el otro electrodo estaba sumergido en la disolución: los estudios se centraron en la preparación de varias sales de manganeso (III) a partir de manganeso (II) y la formación de especies ($H_2O_2$, $H_2SO_5$, $H_2S_2O_8$) a partir de ácido sulfúrico. La formación de este último ($H_2S_2O_8$) se atribuye a la corriente rectificada que se sobreponía a la descarga de A.F.

Las dificultades que en el trabajo anterior se presentaron, como control de temperatura, presión y frecuencia del oscilador, nos movió en el presente trabajo, a mejorar las condiciones experimentales así como el control de los parámetros anteriormente indicados.

---

* Fallecido en 1984. Fue Catedrático y Director del Departamento de Química Inorgánica de la Universidad de La Laguna.

** Fallecido en 1976. Realizó la Tesina de Licenciatura en el Departamento de Química Inorgánica de la Universidad de La Laguna, obteniendo la calificación de Sobresaliente (1973).

En nuestro trabajo, una vez puesto a punto el dispositivo, se encontraron diferencias fundamentales respecto al poder oxidante de la descarga, pues la disolución de sales de manganeso (II) tratadas por A.F. en las condiciones de presión y temperatura descritas por Beltrán y Rodríguez Ríos no dieron combinaciones de manganeso (III), sino que se produjo directamente permanganato.

Esto hace pensar que deben existir otros fenómenos aun no puestos de manifiesto. Por ello, nos propusimos en este trabajo realizar el siguiente programa.

1º) Revisar cuidadosamente las condiciones en que se realizaron los experimentos, para aclarar las causas de las diferencias apuntadas.

2º) Establecer la naturaleza de las especies que se forman en la descarga, al actuar ésta sobre el vapor de agua y el resto de aire existente en el espacio gaseoso de la vasija, para tratar de establecer el mecanismo de la oxidación.

3º) Obtener algunas especies químicas de metales de la 1ª serie de transición en los estados de oxidación "anómalos", con el estudio subsiguiente de su composición y estructura.

El trabajo se ha centrado principalmente en el efecto de la descarga producida entre electrodos situados fuera de la disolución, en el espacio gaseoso, para suprimir los llamados efectos polares de la corriente continua que siempre se superponen a los de la descarga de A.F..

## EXPERIMENTAL

Se utilizó como fuente de energía un oscilador de 3,4 a 4,5 MHz y su circuito sencillo, semejante al utilizado por Beltrán Martínez y Rodríguez Ríos (1) alcanzando unos 75 watios de potencia. El porcentaje de armónicos es alto, por tanto se puede considerar que no tiene una frecuencia fija. Por ello, en trabajos posteriores se utilizó otro oscilador de la casa E.F. Johnson Co. (Waseka, Minnesota, USA) modelo "Viking Challenger", con el Nº 240-182 y serial 46290.

La vasija de descarga fué en principio un matraz de 200 ml. de

tres bocas que fué modificado para adaptarse a las necesidades experimentales. El electrolito empleado, siempre de acuerdo con el trabajo mencionado más arriba, es de 0.1 M de $MnSO_4$ en $H_2SO_4$ 6M.

Los primeros ensayos se relacionaron con la obtención de Mn(III) a partir de Mn(II) pero a pesar de cambiar condiciones de temperatura y presión no se logró tal fin. En todos estos experimentos el producto obtenido fué siempre permanganato potásico. En estos experimentos los electrodos empleados eran de platino y uno de ellos estaba sumergido en el líquido. En estas primeras descargas se estudió la procedencia de la corriente continua y se relacionó la producción de gases con esta, cumpliendo en todo momento la Ley de Faraday en una aproximación aceptable.

El poder oxidante de la descarga de A.F. en el compuesto de Mn(II) y la formación de Mn(VII), está condicionada a la propia A.F. y a la corriente continua, aunque ésta por si sola no es capaz de producir la descarga al voltaje ensayado de 350 voltios. Si hacemos saltar primeramente la descarga con A.F. y sobreponemos una corriente continua a ésta, podemos anular la A.F. y la descarga continuará, obteniéndose los mismos resultados de oxidación (2).

La variación de frecuencia (2.1 a 5.0 MHz) no influyó en los resultados.

Estos experimentos juntamente con modificaciones en la vasija de descarga permitió llegar a la conclusión de que el efecto oxidante de la descarga de A.F. es debido a la ionización de la zona gaseosa. Esto nos indujo a utilizar en los sucesivos experimentos solamente electrodos áereos. Así se utilizó electrodos de aluminio y la vasija fué un matraz de 200 ml. con 4 bocas radiales para los electrodos y una boca central para hacer el vacío y toma de temperaturas.

Ya establecidas las condiciones más idóneas: vasija, electrodos y oscilador, se volvió a comprobar si la descarga de A.F. producía Mn(III). Primeramente se preparó una disolución de $KMnO_4$ 0.01 M en $MnSO_4$ y 0.1 M en $H_2SO_4$ 6M. En segundo lugar, una disolución de $MnSO_4$ 0.1 M en $H_2SO_4$ 6M. y en tercer lugar, se preparó una disolución de Mn(III), partiendo de acetato de manganeso (II), oxidado en medio acético glacial con $KMnO_4$.

Se somete a la descarga de A.F., la segunda disolución durante dos horas. Luego se determina las curvas espectrofotométricas, tanto de la 1º y 3º como de la oxidada con la descarga de alta frecuencia (A.F.), ver FIG. 1.

Analizadas las anteriores curvas espectrofométricas llegamos a la conclusión de que no se ha formado Mn(III) en la descarga de A.F. a

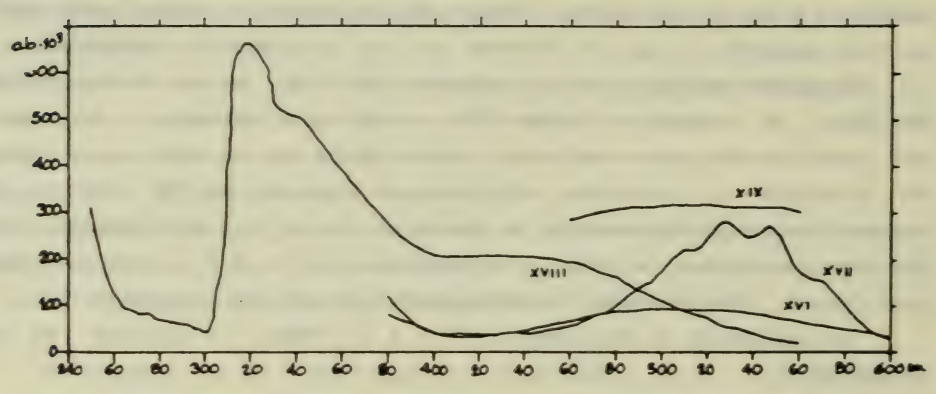



FIG.1

partir de Mn(II), ya que la curva del compuesto oxidado tiene un máximo que corresponde al anión permanganato.

Otras posibilidades que se pueden presentar en la descarga que se ha estudiado anteriormente, es la formación de especies oxidadas, para lo cual se analizó la cantidad de $MnO_4^-$ formada en la descarga de A.F., por dos procedimientos: espectrofotométrico, obteniendo una curva calibrada en una disolución de $MnO_4^-$ en medio $MnSO_4$ 0.1M y $H_2SO_4$ 6M (FIG. 2) y el otro volumétrico, (ácido oxálico y permanganato)(3). Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

| Volumétrico | Espectrofotométrico |
|---|---|
| 11.70 | 11.88 |
| 21.15 | 21.88 |
| 22.25 | 22.83 |

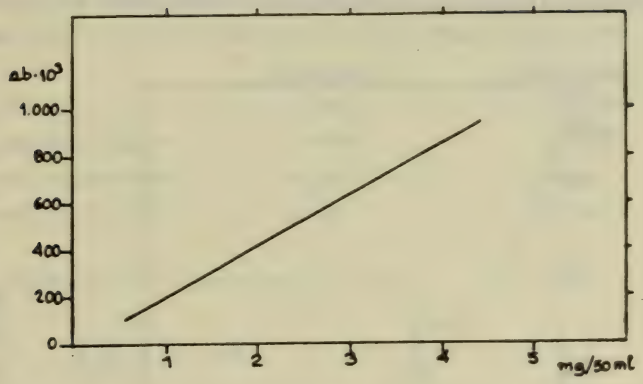



FIG.2

Se estudió asimismo la acción de la descarga en disoluciones variando la acidez. Los resultados obtenidos fueron idénticos a los ya señalados más arriba.

De igual manera se experimentó con sales de cromo y vanadio, obteniéndose estados de oxidación superior. Los cromatos en medio ácido se sometieron a la descarga de A.F., resultando una reducción a Cr(III). Este es el único caso de reducción obtenido en todo nuestro trabajo en medio acuoso.

Con las sales de niquel se pretendió, igual que en los casos anteriores, obtener estados de oxidación superior al NI(II), sin que se observara cambio alguno. En vista de ello, se intentó utilizar la dimetilglioxima como estabilizante de algún estado de oxidación superior del niquel que pudiera producirse en la descarga. Primeramente se preparó una disolución de sulfato de niquel 0.001M en $Na_2SO_4$ 0.001M y otra de dimetilglioxima al 2% en etanol en NaOH al 40%. Se mezclan 40 ml. de la primera y 10 ml. de la segunda, luego se filtra y el filtrado se somete a la A.F. durante dos horas. Al cabo de este tiempo la disolución se

decolora. Como la disolución empleada da un precipitado, se recurrió a la receta recomendada por G. Charlot y R. Gauguin (4) y E.B. Sandell (5) que nos dió una disolución rojiza sin precipitado. A esta disolución se le aplica la descarga de A.F. durante dos horas y la coloración desaparece. Si esta disolución oxidada se deja en reposo en la oscuridad durante cinco días vuelve aparecer el color rojizo con igual intensidad. Ver FIG. 3.

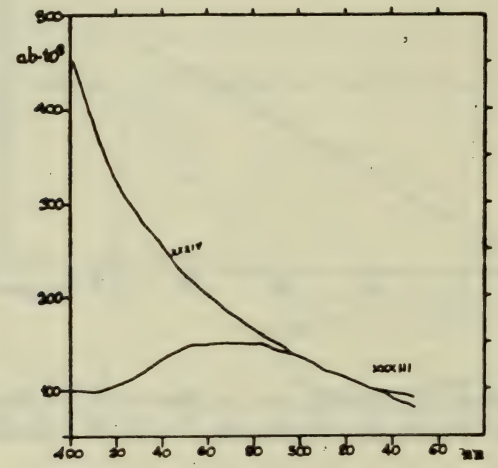


FIG. 3

Esto parece indicar que se produce una modificación en el complejo, pero que éste posteriormente vuelve al estado inicial. Esto nos indujo a pensar que es la dimetilglioxima y no el Ni(II) lo que sufre la transformación. FIG. 4.

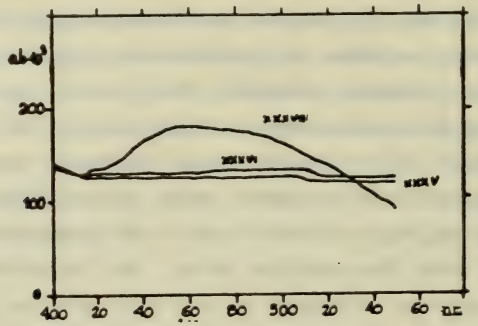


FIG.4

El trabajo anterior nos indujo a estudiar el efecto de la descarga de A.F. en un medio no acuoso. Para ello se eligieron los derivados de los glicoles, de los cuales el dietilenglicol es un buen disolvente. Antes de experimentar el efecto de la descarga sobre sustancias disueltas, se estudia lo que sucede a los disolventes bajo la acción de la descarga.

Una muestra de dietilenglicol después de sufrir los efectos de la descarga de A.F., arrojó los siguientes resultados (Ver FIG. 5):

| | Original | Irradiada |
|---|---|---|
| Densidad a 15°C | 1.180 | 1.1245 |
| Indice de refracción $N_D^{20}$ | 1.4470 | 1.4481 |
| Indice de bromo, mgBr/100 g. | 0.00 | 48.2 |
| Viscosidad (cst) a 37.8°C | 27.8 | 31.0 |

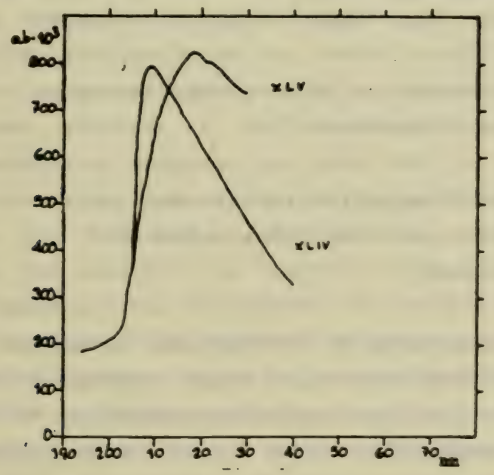



FIG. 5

Se prepara una disolución de sulfato de cobre anhidro en etilen-glicol, pesando 15 mg. de $CuSO_4$ en 50 ml. de etilenglicol. Por la acción de la descarga de A.F. a la temperatura de 5°C se forma un precipitado blanco. Si este precipitado se disuelve en una disolución amoniacal (1:20) no se colorea de azul. En cambio si esta disolución se oxida con agua oxigenada diluída, aparece la coloración azul. Si la temperatura es superior a 10°C, el precipitado formado es de color pardo.

En la TABLA I se dan los resultados obtenidos.

Se realizó el análisis elemental del precipitado blanco, dando los valores:
Carbono 14.58%, Hidrógeno 0.26%, Cobre 60.40%, Oxígeno Resto.

TABLA I

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temp. baño, °C | -9 | 1 | 5 | 10 | 12 | 13 | 15 | 20 |
| Tiempo irrad. (Horas) | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Temp. (°C) zona descarga después de 1 hora. | -6 | 11 | 23 | 34 | 34 | 42 | 44 | 48 |
| Temp. (°C) disolución después de 1 hora. | -9 | 4.5 | 7.6 | 13.5 | 16.5 | 17.4 | 19.2 | 24.5 |
| Presión ensayo mm.Hg | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 1.1 | 0.8 | 1.1 | 0.8 | 1.0 |
| Aspecto del precipitado. | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) |

(1) La disolución presenta un aspecto turbio verdoso y no hay precipitado.
(2) Disolución turbia; después de 24 h. precipita pardo.
(3) Precipitado pardo poco abundante.
(4) Precipitado blanco.
(5) Muy poco precipitado. Disolución turbia amarilla.
(6,7) Precipitado pardo-rojizo. Más clara a los 20°C.
(8) Precipitado pardo-rojizo.

Se obtuvieron los espectros IR en Nujol de la muestra blanca y parda-rojiza; se observa claramente una banda intensa a 2170 $cm^{-1}$ en el producto blanco, mientras que no hay absorción en el pardo. Esta absorción parece corresponder a la frecuencia de vibración de tensión de enlace acetilénico del tipo C C (6) (7). Por otra parte, los porcentajes de cobre, carbono, hidrógeno y oxígeno (éste por diferencia) obtenido en el análisis del producto blanco da la fórmula más sencilla $Cu_2C_2HO_3$.

Sales de hierro, cromo y manganeso se estudiaron en disolución de etilenglicol, resultando que dichas sales en estado de oxidación más altas son reducidas al ser sometidas a la descarga de A.F.

a) Estudio de las especies producidas por la descarga.

Los estudios preliminares de efecto de la descarga de alta

frecuencia sobre disoluciones acuosas en las condiciones vistas anteriormente (1, 2) y en otros trabajos (8), demuestran que los productos finales son el resultado de una acción oxidante. Parece obligado, pues, que se trata de identificar las especies más o menos estables que se forman en el espacio gaseoso durante la descarga con el fin de dar una explicación del mecanismo de las reacciones que tienen lugar.

Las condiciones de trabajo (presión entre 0.5 y 2 mm. Hg., baño frío a temperatura de 0°C o inferiores) hacen pensar que la única especie presente antes que se establezca la descarga es el vapor de agua y aire. Estas circunstancias y las características de la fuente de energía utilizada nos permiten afirmar que los productos formados en la descarga, a partir del vapor de agua deben ser radicales, elementos o moléculas sencillas, principalmente especies diatómicas. Esto condiciona la elección del método instrumental utilizable en la identificación de tales especies.

Nosotros hemos creído que la espectroscopía pudiera ser el método más adecuado y suficientemente preciso y en especial la espectroscopía de emisión, ya que hay un proceso de excitación mediante descarga eléctrica, lo que estimula la emisión de luz por parte de las especies probablemente inestables producidas. Las bandas de los espectros de emisión atribuíbles a transiciones entre estados moleculares excitados en moléculas estables sencillas, permiten obtener información acerca de la estructura electrónica que no podría hacerse a partir de los espectros de absorción.

Es bien sabido que los espectros de emisión (o de absorción) de moléculas sencillas, cuando se observan en aparatos de baja resolución, están constituídos por una serie de bandas debidas a las energías de las transiciones electrónicas que comprenden a su vez cambios de energía de los estados de vibración. Como estas transiciones de vibración están formadas por líneas muy próximas debido a las transiciones de rotación, las bandas del espectro se presentan como un continuo que se interrumpe bruscamente por un extremo (cabeza o cero de banda), mientras que hacia el otro extremo la intensidad va decreciendo (9) (10).

En este trabajo se ha utilizado la espectroscopía como un procedimiento analítico. Las bandas observadas por lectura directa

se han tabulado cuidadosamente, y la asignación de las mismas se ha realizado utilizando las tablas de Pearse y Gaydon (11). En ocasiones ha habido necesidad de elegir entre dos asignaciones, debido a la semejanza entre dos espeçies tabuladas. En estos casos se ha decidido por aquella que resulte más probable en nuestras condiciones de operación; o bien se han eliminado las que no pueden existir por los materiales utilizados.

El instrumento usado fue el construído por la casa Bellingham and Stanley Ltd. y funciona según el principio de Littrow. La lectura es directa y fue calibrado previamente.

La observación de las bandas del espectro de emisión se han realizado empleando una vasija apropiada con una ventanilla de cuarzo situada a la altura de los electrodos.

b) Estudio de las bandas de emisión.

Antes de proceder a la atribución de las bandas de emisión a los elementos o compuestos posibles, es necesario fijar con cierta seguridad cuales deben ser excluídos. Las causas de exclusión pueden ser las siguientes:

1.- El espectro de emisión no se puede obtener en las condiciones experimentales utilizadas.

2.- El espectro de emisión solo puede ser observado en alguna de sus regiones.

3.- La especie a la que puede atribuirse las bandas observadas no se forma en las condiciones de trabajo.

4.- No puede obtenerse, en condiciones normales, el espectro de emisión (caso del oxígeno y del ozono). Las bandas observadas han de referirse necesariamente a:

a) Especies que puedan formarse en vapor de agua, cuando se opera con agua pura o disoluciones acuosas.

b) Especies que puedan formarse por reacciones entre los componentes del aire o por emisión de estados excitados de los mismos.

c) Especies que puedan formarse por reacción entre las especies indicadas en los apartados anteriores y con las sustancias que formen los electrodos o impurezas contenidas en los mismos.

No se tienen en cuenta especies que pudieran formarse a

temperaturas altas, como las que se producen en la llama, las chispas eléctricas, los arcos eléctricos, las descargas de alta frecuencia sin electrodos. También habría que excluir las especies que no pudieran existir a las temperaturas alcanzadas en la zona de descarga.

Se ha tenido en cuenta los componentes de los electrodos, que por análisis dió los resultados siguientes: Al, Zn, Sn, Ge, Fe y Cu. Son probables las asignaciones de AlO, AlH, $ZnH_2$, $ZnH^+$ y SnO. Del resto de los otros metales son poco probables la formación de radicales (11).

## RESULTADOS Y DISCUSION

Las bandas observadas, tanto en el visible como en el ultravioleta, se han tabulado cuidadosamente. Para ello se han construído una serie de tablas que, partiendo del estudio pormenorizado en cada experimento concreto, se van condensando en otras más generales que permiten una visión del conjunto de especies probables y, a la vez, apreciar la frecuencia con que aparecen estas especies en las distintas condiciones en que se trabaja.

En las tablas incluídas en otro trabajo (2), se dan las longitudes de onda encontradas y su atribución a determinada especie en cada caso, especificando la longitud de onda tabulada para ésta, los valores de v' y v''; el sistema de bandas a que pertenece y la intensidad relativa de las transiciones v'- v'' (siendo v' y v'' los valores de los números cuánticos vibratorios).

Las especies identificadas son las siguientes:
$H_2$, $N_2$, $N_2^+$, $O_2^+$, AlO, SnO, SnH, AlH, NO y ZnH.

Pueden existir, además, aquellas que por las causas indicadas anteriormente, no son detectables, como el oxígeno $O_2$ y el $O_3$, además de la molécula ión $H_2^+$. Esta última es de especial interés para nosotros.

Ha sido detectada la molécula ion $N_2^+$. El potencial de ionización de la molécula de nitrógeno $N_2$ es 15.6 eV, mientras que la de la molécula de hidrógeno $H_2$ es 15.42 eV (12) (13). Este

valor, por lo tanto, puede ser alcanzado fácilmente en la descarga, por lo que es muy probable la existencia de la molécula ion $H_3^+$.

No se ha podido detectar tampoco el radical OH, ni siquiera por métodos químicos (reacción con luminol) (2). Aunque los mismo ocurre con la molécula de oxígeno $O_2$. Esta debe existir en pequeñas proporciones, puesto que ha sido claramente detectado el ion molécula $O_2^+$. ($I(O_2)$ = 12.075 eV) (13).

De todas las especies reseñadas, nos interesan en particular aquellas que se pudieran registrar a la temperatura del baño utilizado en los experimentos (0°C) y en disolución acuosa. El hidrógeno $H_2$ parece estar siempre presente, así como las especies $N_2$, $N_2^+$, AlO, SnO y NO. Por lo tanto, habrá que explicar el efecto químico de la descarga en función de la existencia de estas especies y de aquellas que puedan existir, aunque no se hayan comprobado directamente. Ver TABLA II.

a) Interpretación de los efectos oxidantes.

En general, se admite que el proceso de disociación a presión baja producida por una descarga eléctrica se debe al choque de electrones acelerados por el campo eléctrico aplicado, electrones cuya mayoría proceden, a su vez, de colisiones ionizantes (14).

De las técnicas utilizadas para la producción de radicales libres, son importantes las que operan en tres regiones de frecuencias electromagnéticas: baja frecuencia, radiofrecuencia y microondas. Puesto que nuestro trabajo se realiza dentro del segundo caso, nos limitaremos a él.

Utilizando descargas de radiofrecuencia, se encuentra una diferencia significativa respecto de las descargas a bajas frecuencia, tanto en la potencia requerida para el establecimiento de dicha descarga como la necesaria para mantenerla. Esta diferencia se atribuye a que, a altas frecuencias, la pérdida de electrones e iones en los electrodos se reduce considerablemente respecto a la producida a baja frecuencia. La potencia necesaria se puede obtener con osciladores o amplificadores convencionales, como se observa en nuestro caso.

No parece que se hayan realizado estudios sistemáticos de los factores que influyen en el rendimiento de radicales producidos en una descarga de alta frecuencia. Algunos investigadores la han

Tabla II

ESPECTRO VISIBLE

Totalidad de los Especies que aparecen en las distintas condiciones

| Contenido de la vasija | Sin producto | | | | | | | | Con agua desionizada | | | | Con alambre de cobre y agua desionizada | | | | Pastilla LiOH agua dest. | | LiOH 1% | LiOH 10% | NaOH 1% | $KIO_3$ $CuSO_4$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temp °C | 25 | 25 | 25 | 0 | 0 | -12 | -21 | -80 | 0 | -12 | -21 | -80 | 0 | -12 | -21 | -80 | 0 | -21 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| Presión mm. Hg | 2 | 1,5 | 0,5 | 1 | 0,6 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,5 |
| $H_2$ | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| $N_2$ | x | | | x | x | x | x | x | | x | x | x | | x | x | | x | x | x | x | x | |
| $N_2^+$ | x | | | | x | x | x | x | | | | x | | | x | x | | x | | | | |
| $O_2^+$ | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | x | x | x | x | x | x | x | | |
| AlO | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | |
| SnO | x | x | | | | x | | x | | x | | | x | x | | x | x | x | x | x | | |
| SnH | | | x | | | | | | | | | x | | | | x | x | | | | x | |
| AlH | | | x | | x | | | x | | | | | | | | | | | | | | |
| NO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ZnH | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

TABLA II (cont.) ESPECTRO U.V.

| Contenido de la vasija | Totalidad de los Especies que aparecen en las distintas condiciones | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Sin producto | | | | | Con agua desionizada | | | | Past. LiOH desionizada | | | Disol. NaOH 1% | | | Dis. LiOH 1% | | |
| Temp. °C | 23 | 0 | -12 | -21 | -80 | 0 | -12 | -21 | -80 | 0 | -21 | -80 | 0 | -21 | -80 | 0 | -21 | -80 |
| presión mm. Hg | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1.5 |
| $H_2$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $N_2$ | x | x | x | x | x | | | | x | | | | | | | | | |
| $N_2^+$ | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | x | | | x | | x | x |
| $O_2^+$ | x | | | x | x | | | x | | x | | x | x | | x | x | x | x |
| AlO | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SnO | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | x | x | | x | x | | x | x |
| SnH | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AlH | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| NO | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| ZnH | x | x | x | x | x | | | | x | | | | | | | | | x |

utilizado principalmente con gases puros; así, Barth y Kapla (15) para el oxígeno, Joninngs y Linnet (16) para el hidrógeno y Dousmanis y colaboradores (17) para el oxhidrilo. En cambio, no parece haber producido interés el efecto químico de las radiaciones sobre sustancias disueltas en agua u otros disolventes. Puesto que en nuestro trabajo se comprueba la existencia en fase gaseosa de hidrógeno molecular, así como la de nitrógeno y oxígeno, interesa conocer lo que se ha investigado sobre la influencia del agua en la producción de hidrógeno atómico, a efectos de la interpretación que buscamos. Así, Finch (18) encuentra que el hidrógeno seco no se disocia y que el oxígeno y el vapor de agua influyen en el proceso de disociación. El resultadó global de investigaciones sobre estos procesos es que los resultados parecen apoyar la hipótesis de que el agua favorece la producción de átomos de hidrógeno (19).

En las distintas interpretaciones que se ha dado para explicar la acción de radiaciones nucleares, energía luminosa, flujo de electrones y otros procedimientos sobre el agua, se admite que se forman, a la vez, partículas cargadas de vida corta y radicales libres y moléculas excitadas de vida larga, de acuerdo con lo que en radioquímica se denomina efectos directos e indirectos de dichos radicales (20). Así, la descomposición de la molécula de agua por la acción de radicales ionizantes provoca la aparición en la disolución de átomos y radicales con valencia insaturada de gran reactividad.

Considerando lo expuesto anteriormente, las reacciones en cadena que se producen terminan en al aparición de $H_2O_2$ y, como producto intermedio, radicales OH. En nuestro estudio, no hemos podido constatar la presencia de ninguna de estas dos especies. Por lo que se refiere al peróxido de hidrógeno, como se puede apreciar al principio de trabajo, no aparece acción alguna de esta especie sobre el anión permanganato producido en la oxidación de las sales de manganeso(II) por la descarga de radiofrecuencia. De igual manera, el espectro de emisión del radical OH presenta una banda fuerte bien caracterizada a los 3.064 Å (11), que nosotros no hemos encontrado en ningún caso. Tampoco se ha podido identificar este radical por métodos químicos; por ejemplo, no se produce la luminiscencia característica cuando actúa sobre luminol (2).

Los procesos descritos no parecen, en efecto, encajar con los obtenidos en nuestro trabajo. Continuando la revisión bibliográfica, los hemos comparado con los efectos químicos de los ultrasonidos, lo que parece conveniente, teniendo en cuenta la influencia que, como hemos observado, tiene la frecuencia en los fenómenos estudiados, y también por las especiales condiciones en que se producen los efectos químicos de los ultrasonidos. Por ello haremos un resumen lo más breve posible.

En efecto, se ha comprobado que la realización de reacciones químicas en campos ultrasónicos depende del fenómeno llamado cavitación, que consiste en la formación de burbujas en el líquido y su subsiguiente destrucción, acompañado todo ello de intensos "shocks" hidráulicos. Estas burbujas se forman cuando en un punto del líquido se produce una caída de presión superior a la cohesión del mismo. Así que cuando se somete un líquido a ondas ultrasónicas de gran intensidad se puede producir una ruptura en la continuidad del líquido con formación de cavidades, es decir, burbujas de cavitación en los puntos en que se produce una rarefacción (21)-(24).

Todos los factores que inhiban la formación de burbujas impiden la producción de fenómenos químicos en campo ultrasónico. Estos fenómenos son diversos: oxidaciones, reducciones, degradaciones, síntesis de compuestos inorgánicos y orgánicos, polimerizaciones,despolimerizaciones y reagrupamientos intermoleculares. Puede afirmarse que el fenómeno de la cavitación se considera generalmente como responsable de casi todas las reacciones químicas observadas en medio irradiado. La inducción de reacciones químicas en un campo ultrasónico no solo está asociada al colapso de la burbuja de cavitación, sino también con su resonancia pulsante periódica.

Los fenómenos químicos en un campo ultrasónico se deben a la formación de burbujas de tamaños resonantes (21) y la acción química se produce en el sitio de la cavitación (22). Según Smith (23) burbujas de cavitación con diámetro 0.66 mm. entrarían en resonancia mediante una frecuencia de 10 KHz. Según Rust (24), con esta frecuencia acústica se pueden producir reacciones químicas, a la presión antianódica, en burbujas de cavitación del tamaño

indicado.

Es probable que los fenómenos químicos ultrasónicos no se deban exclusivamente a las fuerzas mecánicas producidas por la destrucción de las burbujas de cavitación resonantes, pues existe evidencia de que dichos fenómenos se producen por procesos electroquímicos o fotoquímicos provocados en ellos durante la etapa inicial de su formación y desarrollo: se cree que un rasgo característico de este estado es la producción de una gran tensión eléctrica en la burbuja. Según Frenkel (25), esta gran tensión eléctrica puede producir la destrucción de la burbuja. Es decir, que en la etapa inicial de la formación de una burbuja de cavitación, aparecen en ella cargas eléctricas móviles. Frenkel (25) supone que la ruptura de la continuidad del medio en los lugares de rarefacción no conduce a la formación de una burbuja esférica, sino a una cavidad lenticular que luego pasa a esférica por la gradual penetración de vapor del líquido dentro de la cavidad.

El'piner (26) opina que, al formar la descarga eléctrica en una burbuja de cavitación, partículas altamente energéticas (moléculas excitadas e ionizadas procedentes de iones, radicales libres, etc.), deben desarrollarse métodos que permitan regular y controlar las reacciones, aunque reconoce la dificultad de realización de este propósito; y a continuación manifiesta que la comparación de las reacciones químicas ultrasónicas con las reacciones químicas producidas en una fase gaseosa bajo la acción de radiaciones nucleares, energía luminosa, flujo de electrones, etc. podría ser una línea de trabajo efectiva a este respecto. Evidentemente, nuestra línea de trabajo está dentro de esta recomendación de El'piner.

Está clara la semejanza entre los efectos de las ondas ultrasónicas y la radiación de alta energía, pues en ambos casos se producen dos reacciones primarias simultáneas que conducen a la formación de radicales libres $OH\cdot$ y $H\cdot$ o iones $OH^-$ y $H^+$, y también a moléculas de $H_2O_2$ y $H_2$ (27):

$$H_2O \longrightarrow OH\cdot + H\cdot\ ;\ 2OH\cdot + 2H\cdot \longrightarrow H_2O_2 + H_2,\ o$$

$$H_2O \longrightarrow H^+ + OH^-;\ 2H_2O \longrightarrow H_2O_2 + H_2$$

Sin embargo, existen también diferencias, pues la radiación

actúa sobre moléculas de agua en la fase líquida, mientras que las ondas ultrasónicas ejercen su acción en la fase gaseosa (burbuja de cavitación). Estas diferencias son importantes, pues los productos de la acción primaria, al destruirse la burbuja, se difunden en el líquido y reaccionan con las sustancias disueltas en el agua. Así resulta comprensible que aparezcan oxígeno molecular y moléculas de hidrógeno de una disolución acuosa exenta de oxígeno (28). Miller (20) admitió que existe relación entre reacciones químicas y efectos electroquímicos de la cavitación; y también que la reacción química primaria en campo ultrasónico es la descomposición de las moléculas de agua.

La revisión bibliográfica anterior sugiere que las reacciones ultrasónicas inducidas por cavitación se producen en dos etapas. En la primera, según Frenkel (25), en la burbuja se producen efectos foto y electroquímicos cuando la presión es muy baja; las condiciones creadas en este momento son las características de una descarga eléctrica a baja presión en presencia de sustancias y gases en estado de vapor, de manera que los gases sufren una ionización o activación. En una segunda etapa, la burbuja se destruye y los radicales y átomos formados pasan a la disolución, donde producen reacciones secundarias. Esta descripción se corresponde, en líneas generales, con el dispositivo que nosotros utilizamos. Otro aspecto interesante del fenómeno ultrasónico por la relación que tiene con nuestro trabajo, es la luminiscencia que le acompaña.

De gran importancia para nosotros puede considerarse la hipótesis de la formación del ion $H_2^+$ en la fase gaseosa. Este ion tendrá propiedades oxidantes; y según Weiss (29), puede formarse también en la fase líquida, según el proceso $H + H^+ \longrightarrow H_2^+$. Indica este autor que, si bien pudiera parecer que este equilibrio debiera desplazarse en el sentido de la disociación a causa del gran calor de hidratación del protón, este calor estaría compensado por la energía de enlace (2.65 eV) de la molécula $H_2^+$ y también por su calor de hidratación (su forma hidratada se representaría por $H_4O^+$, similar a $H_3O^+$).

Este ion ($H_2^+$) se comporta como un aceptor de electrones, lo que explicaría sus propiedades oxidantes, ya indicadas frente al

carácter fuertemente reductor de los átomos de hidrógeno, que es un dador de electrones. Su formación se facilita a pH bajos. Así se pueden producir oxidaciones tales como:

$H_2^+ + I^- \longrightarrow H_2 + I$; $Fe^{2+} + H_2^+ \longrightarrow Fe^{3+} + H_2$

Es decir, que la oxidación por el ion $H_2^+$ debe ir acompañada por la producción de moléculas de hidrógeno $H_2$.

b) Preparación y estudio de un periodato de cobre.

Como aplicación de lo expuesto anteriormente, se pretendió preparar un periodato de cobre(III). La idea que nos guió para la elección de un compuesto de Cobre(III) se fundamentó en los trabajos de Malatesta y otros autores (30), quienes obtuvieron periodato de cobre(III) mediante persulfato potásico. Comprobada la acción oxidante de la descarga sobre disoluciones acuosas, se pretendió obtener dichos productos sustituyendo el efecto del persulfato por el de la descarga de alta frecuencia. Sin embargo, se obtuvo un precipitado de color pardo, cuyas propiedades no coincidían con los productos preparados por los autores citados.

b.1) Síntesis del producto.

El sistema empleado para producir la descarga es igual al descrito anteriormente: un matraz de reacción, cuatro electrodos de aluminio, un baño termostatado a 0°C, un agitador magnético, un manómetro calibrado en mmHg., una bomba de vacío y el oscilador descrito anteriormente. El electrolito empleado se prepara a partir de dos disoluciones 0.05 M de sulfato de cobre y iodato potásico, concentraciones adecuadas para que a la temperatura de trabajo (0°C) no precipite el iodato de cobre(II).

Se introducen en las vasija de descarga 50 ml. de cada una de las disoluciones de sulfato de cobre y de iodato potásico; se homogeniza a la temperatura de 0°C. Se hace saltar la descarga, una vez conseguido el vacío de 1 mmHg. de presión. En principio la disolución toma color violeta y posteriormente se forma un precipitado de color pardo que después de 2 horas se recoge en una placa porosa.

b.2) Análisis.

Se disuelve una muestra pesada del producto pardo en ácido clorhídrico, previa adición de ioduro potásico. Se libera una cierta cantidad de iodo, que se valora con tiosulfato sódico 0.1 N.

El iodo total liberado puede proceder, completamente o en parte, de los meta- y/o ortoperiodatos, los iodatos, cobre(II), y cobre(III). Por otra parte, se analizó el contenido de cobre y potasio. Estos valores no permiten determinar la fórmula del producto. Por ello, resulta necesario acudir a métodos que no destruyan, para poder establecer:

1.- Si el cobre está en estado de oxidación II, en estado de oxidación III, o en ambos.

2.- Si el iodo contenido en el producto procede del iodato, periodato, o de ambos simultaneamente.

La eliminación por medidas físicas de algunas de estas posibilidades facilitaría mucho la determinación de la fórmula. Por lo tanto, realizamos los estudios por métodos físicos antes de establecer el porcentaje de iodo que contiene el producto, una vez se sepa cuales son los oxoaniones que forman dicho producto y los estados o el estado de oxidación del cobre.

b.3) Estado de oxidación del cobre.

Es posible que por la acción de la descarga de alta frecuencia pueda estabilizarse el estado de oxidación tripositivo, mediante la formación *in situ* del periodato de cobre(III). Periodatos de Cu(III) son conocidos desde los trabajos iniciales de Urtis (31), Malaprade (32) y Malatesta (33).

Nuestro producto de color pardo (insoluble en agua), podría suponerse que contiene cobre (III). Para aclarar este extremo, aplicamos las siguientes técnicas físicas: medidas de la susceptibilidad magnética y espectroscopía electrónica (reflectancia difusa).

b.4) Medidas de la susceptibilidad magnética.

Las primeras medidas de susceptibilidad realizadas con una balanza sencilla de Gouy, a la temperatura ambiente, dieron valores positivos que evidenciaron que el producto contenía, al menos en parte, cobre en el estado dipositivo. El valor promedio de la susceptibilidad específica obtenida para el producto pardo fué de $3,8396 \cdot 10^{-6}$ u.c.g.s. a temperatura en torno a 20°C. La determinación realizada en igualdad de condiciones con el periodato de cobre(II), dió una susceptibilidad específica media de $6.0983 \cdot 10^{-6}$ u.c.g.s. Teniendo en cuenta que este último valor y los

encontrados en la bibliografía (Uggla et al. (34)), son superiores a los del producto pardo, podría pensarse en la existencia de un cierto antiferromagnetismo producido por el Cu(III) en nuestro producto. En consecuencia, consideramos necesario probar la existencia de un punto de Neel, estudiando la susceptibilidad en función de la temperatura. Primero hemos hecho el estudio para el periodato de cobre(II), y los resultados se encuentran en la TABLA III.

A continuación hemos estudiado nuestro producto y los valores obtenidos están en la TABLA IV.

Se puede observar que los valores de 1/X, en los dos casos son crecientes respecto de la temperatura. Ambos presentan características similares.

En cualquier caso, queda confirmado que los productos son claramente paramagnéticos, con un comportamiento normal (es decir, que X disminuye gradualmente con la temperatura), y que no se presenta indicios de antiferromagnetismo (no existe un punto de Néel) en el intervalo de temperatura estudiado.

TABLA III

| T°K | $X_g \times 10^6$ | $1/X_g$ | $(1/X_g)\times10^{-3}$ |
|---|---|---|---|
| 65,456 | 5,779 | 173.040 | 173,04 |
| 71,072 | 4,983 | 200.682 | 200,68 |
| 77,819 | 4,718 | 211.954 | 211,95 |
| 230,845 | 4,837 | 206.739 | 206,74 |
| 269,491 | 4,755 | 210.304,7 | 210,30 |
| 296,682 | 4,600 | 217.391,3 | 217,39 |

TABLA IV

| T°K | $X_g \times 10^6$ | $1/X_g$ | $1/X_g \times 10^{-3}$ |
|---|---|---|---|
| 66,667 | 14,292 | 69.969,2 | 69,97 |
| 71,197 | 13,284 | 75.278,5 | 75,28 |
| 78,492 | 12,025 | 83.160,1 | 83,16 |
| 230,984 | 4,962 | 201.531,6 | 201,53 |
| 269,920 | 3,962 | 252.397,8 | 252,40 |
| 290,583 | 3,827 | 261.301,28 | 261,30 |

Los resultados obtenidos hasta este momento, cuestionan la existencia en el compuesto estudiado de cobre en estado

exlusivamente tripositivo. En la no muy abundante bibliografía acerca del estado tripositivo del cobre, se ha comprobado que su comportamiento magnético depende de la estereoquímica de sus compuestos. Así, Jensovsky y Ralek (35) estudian una serie de periodatos complejos del tipo:

$M_aH_b(Cu(IO_6)_2)\cdot XH_2O$, que contienen Cu(III)

donde M es $Na^+$ ó $K^+$ y la suma a + b = 7, encontrando que son diamagnéticos y que sus valores coinciden, en general, con la suma de las susceptibilidades del ion $IO_6^-$, $H_2O$, $K^+$, $Na^+$ y $H^+$. Por ello propone una disposición cuadrada plana, $dsp^2$, en torno al átomo central.

La influencia de la estereoquímica en las propiedades magnéticas del cobre tripositivo puede verse en un trabajo de Arjomand y Machin (36), quienes estudiaron diferentes propiedades de óxidos ternarios que contiene cobre en los estados de oxidación I, II, III y IV y encuentran que el momento magnético de combinaciones tales como

$BaCuO_{2.5}$; $YCuO_3$ y $LaCuO_3$

(con estructuras octaédricas alrededor del cobre, probadas mediante rayos X), están comprendidos entre 3,0 MB a 300°K y 2,1 MB a 80°K. Estos valores son normales para un ión $d^8$ (como el $Ni^{2+}$) en disposición tetraédrica o pentacoordinada (37). Teniendo en cuenta los valores de la susceptibilidad magnética obtenida en nuestro producto y suponiendo una relación cobre/iodo ≈2 (como se justifica más adelante), podemos decir que el cobre en su totalidad no está en estado de oxidación III, cualquiera que fuese su índice de coordinación en nuestros productos.

b.5) Espectros electrónicos.

La insolubilidad del producto pardo en agua u otros disolventes no permite la obtención del espectro electrónico en disolución. Por ello hemos usado la reflectancia difusa en estado sólido.

Los espectros obtenidos en disolución y por reflectancia difusa no tiene que ser necesariamente iguales. Las sales de cobre (III) suelen ser de color marrón más o menos intenso y sus disoluciones tienen color amarillo. Sus espectros electrónicos han sido estudiados por diversos autores, especialmente en la zona del

ultravioleta (U.V.) y utilizando disoluciones de periodatos complejos de metales alcalinos principalmente. Así lo han hecho Jatsimirskii y Lu CZao-Da (38), Banerjee y Basu (39), Jensovsky (40), Kirschenbaum et al. (41), Cohen y Atkinson (42) y Balikungeri et al. (43). Este último obtiene los espectros en disolución del ión diperiodato cuprato (III), en la zona U.V., y los compara con los obtenidos por Jensovsky (40) y por Cohen (42), encontrando que se obtienen dos bandas claramente definidas con máximos en 417 ± 5 nm y 264 ± 2 nm., que están de acuerdo con los valores de Jensovsky 415 y 265 respectivamente (40).

Nosotros hemos obtenido el espectro de reflectancia difusa del producto pardo y del periodato de cobre (II). (FIGS. 6 y 7).

Resulta evidente que el producto pardo no presenta las dos bandas descritas por los autores citados anteriormente. En la zona del U.V., la banda tiene un máximo en 325 nm, y una pequeña meseta en la zona de los 400 nm. Para el periodato hay un máximo en 299 nm. En el visible aparece en ambos casos, tanto del producto pardo como el del periodato de cobre (II), la banda ancha con un máximo en 825 nm.

Lo dicho anteriormente parece probar que el cobre en el producto pardo no está en estado de oxidación tripositivo. Queda, entonces, por explicar las características del espectro del producto pardo.

En una investigación sobre diferentes sustancias mediante reflectancia difusa en la región de 200 a 1000 nm, utilizando sales en polvo, Griffiths et al. (44) estudia los espectros de iodatos y periodatos, encontrando que en estas sustancias se producen diferencias importantes entre los espectros de polvo y disoluciones acuosas. Hay dos diferencias notables : a) las bandas encontradas en la región de 300 nm para el periodato potásico ($KIO_4$), para el trihidrógenoortoperiodato sódico ($Na_2H_3IO_6$) y el iodato potásico ($KIO_3$) no están resueltas en absoluto en las disoluciones; b) que la banda intensa en 222 nm, caracterísitica del periodato en disolución neutra (45), no se encuentran en el periodato de sodio. Los máximos encontrados por estos autores para las bandas observadas son: en el periodato potásico ($KIO_4$), 320 nm; en el trihidrógenoortoperiodato sódico ($Na_2H_3IO_6$), 325 nm; y en el

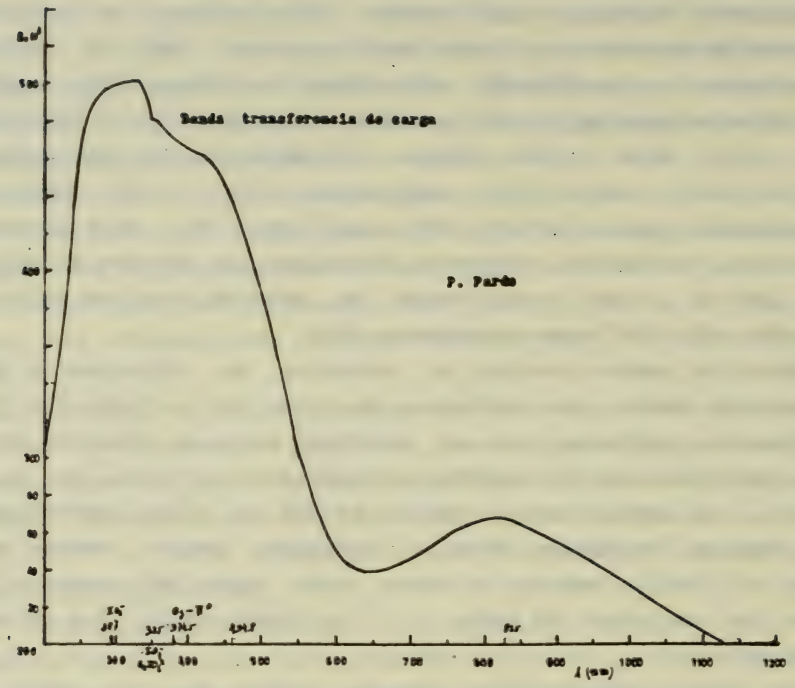

Bandas transferencia de carga
P. Pardo

FIG. 6

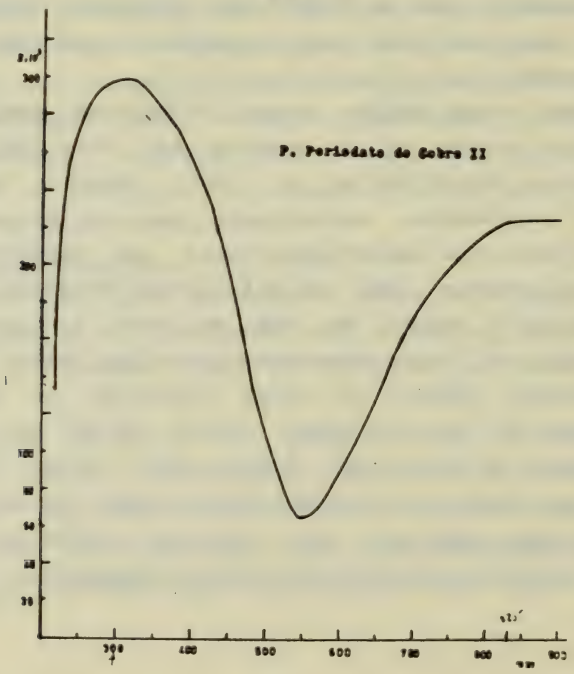

P. Periodato de Cobre II

FIG. 7

iodato potásico ($KIO_3$), 287.5 nm.

Si comparamos estos resultados con el obtenido en el producto pardo, llegamos a la importante conclusión de que la banda intensa encontrada en la zona U.V. se debe a la existencia de iones periodatos y/o ortoperiodatos, pues se presentan los máximos encontrados por Griffths (44) y no aparece, en cambio, la banda en 222 nm. Otra consecuencia importante es que no deben existir en los productos aniones iodato, $IO_3^-$, pues no aparecen indicios de bandas en torno a 287 nm.

En el producto pardo aparece el máximo de una banda solapada en la zona de los 400 nm que limita las zonas U.V. y visible, cayendo el extremo de esta banda en la zona visible (azul). De acuerdo con la bibliografía, los compuestos y combinaciones complejas de cobre dipositivo son azules o verdes, colores que se deben a una banda de absorción en la región de los 600-900 nm (46) (47). Las excepciones se deben, generalmente, a fuertes bandas ultravioletas, que son bandas de transferencia de carga, cuyo extremo cae en el extremo azul del espectro visible, por lo que las sustancias aparecen rojas o pardas (46) (47).

Parece, pues, claro que la forma que presenta el espectro del producto pardo en el U.V. y en la zona del visible próximo se debe a la superposición de la fuerte banda de los iones periodatos con la banda de transferencia de carga típica de algunos complejos de cobre (II) (47). Esta banda desaparece cuando desaparece igualmente el color pardo del producto.

Lo dicho anteriormente parece probar que nuestro producto contiene cobre sólo en el estado dipositivo y iones periodato con otras posibilidades que veremos más adelante. Puesto que se trata de un metal difícilmente oxidable y de ligandos fácilmente reducibles, suponiendo que el producto sea un complejo hexacoordinado, la banda de transferencia de carga debe ser de tipo metal ——> ligando, y puede aparecer en la zona visible azul (47).

Así, Lever et al. (48) estudian el complejo de cobre: $Cu(pic\ O)_2 \cdot 2H_2O$ (pic O = ácido picolínico N-óxido) y encuentran una transición $e_g$ ——> $\pi^*$ en 26.700 $cm^{-1}$ (374,5 nm), que, además, se presenta como un hombro, igual que sucede en nuestro caso. Mientras

Williams (49) estudia el ion ([Cu(o-fen)]$^{+}$, (fen =fenantrolina), y encuentra una transición a 23.000 $cm^{-1}$ (434,8 nm). Como puede verse, los valores de las longitudes de onda están próximos a los de la meseta que presenta el espectro del producto pardo.

b.6) Espectros infrarrojos.

Los espectros de los productos se han obtenido en pastillas de KBr. Las sustancias utilizadas han sido los productos pardo (obtenido en este trabajo), dihidrógenoortoperiodato trisódico, $Na_3H_2IO_6$, e hidrógenoortoperiodato de cobre(II), $Cu_2HIO_6 \cdot 2H_2O$.

Los espectros están representados en la TABLA V. Lo primero que se observa es una acusada semejanza entre los espectros del producto pardo y el $Na_3H_2IO_6$. Para mayor información sobre el estudio comparativo de los distintos espectros, ver Tesis doctoral F. González Regalado (2). De este estudio comparativo se deduce:

1.- Todo el iodo contenido en el producto pardo está en el estado de oxidación VII, en forma de ión ortoperiodato $IO_6H_x^{-(5-x)}$, siendo $x \neq 0$.

2.- El cobre permance en el estado de oxidación (II).

3.- El producto pardo es una hidroxisal, posiblemente en forma polímera.

TABLA V

| Sustancia Bandas $cm^{-1}$ | Producto pardo | $KIO_3$ | $KIO_4$ | $Na_3IO_6H_2$ | $Cu_2HIO_6$ |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 3480(mf |
| | | | 3460(f) | | |
| | | 3450(f) | | | |
| | 3300(f) | | | 3380(f) | |
| | | | | 2440(m) | 2320(h) |
| | 2250(d) | | | | |
| | | | 1645(m) | | |
| | 1620(m) | 1630(m) | | | 1630(m) |
| | | | | 1615(m) | |
| | | | | | 1430(m) |
| | 1400(d) | | | | |
| | | | 1385(d) | | 1195(m) |
| | | | 1385(d) | | |
| | 1150(m) | | | 1120(d) | |
| | | | | | 1130(f) |
| | | | | | 1110(f) |
| | 1030(m) | | | | 1030(m) |
| | | | 850(mmf) | | |
| | | 800(f) | | | |
| | | 755(mf) | | | |
| | 690(mf) | | | 680(mf) | |
| | | | | | 690(mf) |
| | 650(f) | | | | |
| | 525(mf) | | | | 490(mf) |
| | | | | 480(mf) | |
| | | | | | 403(mf) |
| | 375(ho.mf | 350(f) | | | 350(f) |
| | | | | 310(mf) | |
| | | | 300(f) | | |

mf = muy fuerte; f = fuerte; m = media; d = débil
md = muy débil; h = hombro

4.- Este producto se descompone por calentamiento, a temperatura inferior a 70°C.

b.7) Pureza del producto pardo.

Se hace un análisis con rayos X (difracción en polvo) de los siguientes productos: producto pardo, iodato potásico $KIO_3$, periodato potásico $KIO_4$, ortoperiodatotrisódico $Na_3H_2IO_6$, y también de una serie de sustancias que contienen cobre en estado de oxidación II y III que pudieran relacionarse con nuestro producto (ver Tesis Doctoral F.G. Regalado (2)).

Los datos obtenidos demuestran claramente que la estructura cristalina del producto pardo es diferente, tanto respecto a los reactivos utilizados para su preparación como de las sustancias elegidas para comparar.

Todos los resultados obtenidos hasta aquí, además de los citados por difracción en polvo de rayos X, parecen indicar claramente que el producto pardo es una sustancia pura

Estudiado las características físicas del compuesto pardo, se hizo el análisis elemental dando los siguientes resultados (valores promedios):

Cu = 31,43%, I = 32,99%, K = 2.04%, O = 33,20%

Del análisis termogravimétrico se determina el contenido en agua de cristalización (Tesis Doctoral de F.G. Regalado (2)); el valor encontrado fue de 7,5%.

Como resumen de todo lo estudiado podemos establecer:

1.- Todo el cobre contenido en el producto está en el estado de Cu(II).

2.- Todo el iodo contenido en el mismo está en forma de ortoperiodato del tipo $IO_6H_x^{-(5-x)}$, con $0 < x < 5$.

3.- El cobre, el iodo y el potasio están en relación

Cu:I:K: = 9.5:5:1

4.- La insolubilidad del producto y la existencia de enlaces Cu-OH, según muestra el espectro IR, indica que se trata de una sal básica.

5.- El producto contiene agua de cristalización. Entre los productos citados en la bibliografía que nos pueden interesar a efectos de proponer una fórmula de nuestro producto, podemos escoger el obtenido por Nasänen (50) de fórmula $Cu_2HIO_6 \cdot 2H_2O$.

En efecto, el producto presenta las siguientes propiedades:

a).- Es un compuesto de cobre (II) insoluble en agua.

b).- La relación Cu:I es 2, próximo al valor 1.90 encontrado por nosotros en el producto pardo.

Por otra parte, la incorporación de potasio (I), puede rebajar la relación Cu:I, por sustitución de cobre por aquel; mientras que la acción de los radicales OH formados en la descarga propiciaría la obtención de una sal básica.

Si quintuplicamos la fórmula $Cu_2HIO_6$ (prescindiendo del agua de cristalización) y se sustituye medio átomo de cobre por uno de potasio, resultaría una fórmula tal como:

$$Cu_{9.5}K(IO_6H)_5$$

en la que la relación Cu:I:K es, efectivamente, 9.5:5:1.

Se puede admitir que al iniciarse la descarga el ortoperiodato, procedente de oxidación de iodato, formase la sal insoluble $Cu_2HIO_6$; y que la incorporación posterior de grupos OH y de potasio modificase la estructura, haciendo variar la proporción de Cu a I.

Por todo ello, proponemos como fórmula probable del producto pardo la siguiente:

$$(HIO_6)_4(H_2IO_6)Cu_9K\cdot 1/2[Cu(OH)_2]\cdot 8H_2O$$

posiblemente un polímero en el que el potasio serviría como compensador de cargas en la estructura polimérica.

Los porcentajes teóricos y los encontrados son los siguientes:
Calculado: I 32,97; Cu 31,37; K 2,03; $O_t$ 32,42; $H_2O$ 7,49
Encontrados: I 32,99; Cu 31,43; K 2,04; $O_t$ 32,42; $H_2O \approx 7,5$
(en el oxígeno total, $O_t$, va incluído el del agua).

La existencia de ortoperiodatos básicos no estequiométricos ha sido estudiada por Näsänen (50), que describe la existencia de combinaciones tales como:

$$Cu(OH)_{1.5}(H_4IO_6)_{0.5};\ Cu(OH)_{1.6}(H_4IO_6)_{0.4}$$

$$CuNa_{0.5}(OH)_2(H_4IO_6)_{0.5}$$

Según Näsänen et al. (51) puede existir el compuesto:

$$Cu_2(OH)H_2IO_6$$

con una molécula de agua o anhidro. En la obra clásica de Wells (52) se encuentran descritas las estructuras cristalinas de diversas sales básicas análogas a nuestro producto pardo.

b.8) Cálculos de los momentos magnéticos efectivos.

Una vez propuesta la fórmula probable para el producto pardo

es posible determinar los momentos magnéticos efectivos, pues disponemos del peso molecular y las susceptibilidades magnéticas específicas en función de la temperatura. Estos nuevos datos sobre momentos magnéticos efectivos pueden proporcionarnos indicaciones sobre la posible estructura de la combinación que estudiamos.

Las susceptibilidades diamagnéticas de los componentes del producto pardo se han tomado de Bourdeaux y Mulay (53), excepto la del ortoparaperiodato $IO_6H^-$, que es la dada por Jensovsky y Rálek (35). Estos valores son, en u.c.g.s.:

$IO_6H$, $-65,8 \times 10^{-6}$; $Cu^{2+}$, $-12,8 \times 10^{-6}$

$K^+$, $-13,0 \times 10^{-6}$; $OH^-$, $-12 \times 10^{-6}$ y

$H_2O$, $-13,0 \times 10^{-6}$

De acuerdo con la fórmula propuesta para el producto pardo, la corrección diamagnética es $X_D = -579,6 \times 10^{-6}$ y el peso molecular M = 1.924,414.

TABLA VI

| T (°C) | $X_M \times 10^6$ | X' x $10^6$ | $X_{Cu} \times 10^6$ | $\mu_{ef}$(M.B.) | $1/X_{Cu}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 66,667 | 27.503,7 | 28.083,3 | 2.956,14 | 1,255 | 338,28 |
| 71,197 | 25.563,9 | 26.143,5 | 2.751,95 | 1,252 | 363,37 |
| 78,492 | 23.144,1 | 23.720,7 | 2.496,91 | 1,252 | 400,50 |
| 230,984 | 9.548,9 | 10.128,5 | 1.066,16 | 1,400 | 937,94 |
| 269,92 | 7.624,5 | 8.204,1 | 863,59 | 1,365 | 1.157,96 |
| 290,583 | 7.364,7 | 7.944,3 | 836,25 | 1,394 | 1.195,82 |

En la tabla se pueden observar las siguientes particularidades:

a).- Los valores de 1/X frente a T varían de manera regular, bien alineados a las temperaturas bajas y más dispersos a temperaturas altas.

TABLA VII

| T°K | $X_M \times 10^6$ | $X_x \times 10^6$ | $X_{Cu} \times 10^6$ | $\mu_{ef}$ | $1/X_{Cu}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 65,556 | 2.236,58 | 2.353,98 | 1.176,99 | 0,78 | 849,62 |
| 71,072 | 1.928,51 | 2.045,91 | 1.022,96 | 0,76 | 977,58 |
| 77,819 | 1.825,95 | 1.943,35 | 971,67 | 0,78 | 1.029,14 |
| 230,845 | 1.876,00 | 1.993,41 | 996,70 | 1,35 | 1.003,31 |
| 269,941 | 1.840,27 | 1.957,67 | 978,83 | 1,45 | 1.021,62 |
| 296,682 | 1.780,28 | 1.897,69 | 948,84 | 1,50 | 1.053,93 |

b).- En la representación de las susceptibilidades $X_{Cu}$ frente a las temperaturas absolutas se aprecia un descenso de aquellas al aumentar estas últimas, lo cual indica un comportamiento "normal" del producto pardo en sus propiedades magnéticas.

c).- No obstante, en la TABLA VI se advierte que los momentos magnéticos efectivos, $\mu_{ef}$, varían poco con la temperatura y sus valores son netamente inferiores a los encontrados para el cobre (II), que suelen variar entre 1.75 y 2.20 M.B. (46).

Con el fin de establecer comparaciones con sustancias análogas, como hemos hecho anteriormente, se ha estudiado también el comportamiento magnético del hidrógenoortoperiodato de cobre (II), $Cu_2HIO_6 \cdot 2H_2O$. Se ha procedido como con el producto pardo y los resultados obtenidos se refleja en la TABLA VII.

Los resultados indican que el comportamiento magnético del $Cu_2HIO_6 \cdot 2H_2O$ es similar al del compuesto pardo que estudiamos en este trabajo. Una explicación de los bajos momentos magnéticos, podría encontrarse en la circunstancia de que el producto pardo, como parece por su insolubilidad, sea un polímero. Podemos citar el trabajo de Uggla et al (34), donde discuten las propiedades magnéticas de diversos compuestos de cobre (II) relacionados con el nuestro, entre ellos el $Cu_2HIO_6 \cdot 2H_2O$, encontrando que este producto está polimerizado, y además impurificado por el monómero, según como se haya realizado la preparación. Esto produce variaciones en el valor de las susceptibilidades magnéticas. Si nosotros comparamos algunos momentos magnéticos del ortoperiodato de cobre (II) dados por estos autores (34), con algunos valores encontrados por nosotros para el producto pardo, como se indica en el siguiente cuadro comparativo:

| Producto | Temp. (°K) | $\mu_{ef}$(M.B.) |
|---|---|---|
| $Cu_2HIO_6 \cdot 2H_2O$ (Ref. 34) | 93 | 0,79 |
| | 223 | 1,31 |
| | 273 | 1,38 |
| | 293 | 1,41 |
| Producto pardo | 78,5 | 1,25 |
| | 231 | 1,40 |
| | 270 | 1,36 |
| | 290 | 1,39 |

Está clara la concordancia en temperaturas próximas al ambiente, por lo cual, estimamos que tanto las irregularidades observadas por nosotros al estudiar el ortoperiodato de cobre (II), como las propiedades magnéticas del producto pardo, pueden deberse a la presencia simultánea de monómeros y polímeros.

En la FIG. 8 hemos representado conjuntamente los momentos magnéticos efectivos de periodato de cobre (II) y del producto pardo frente a la temperatura (°K) para visualizar lo dicho. Ambas representaciones son similares, con valor casi constante en el caso del producto pardo.

AGRADECIMIENTOS

Queremos hacer constar nuestro agradecimiento al Departamento de Química de la Universidad de Zaragoza por la colaboración prestada en la realización de las medidas de susceptibilidades magnéticas.

También al Lic. Antonio García Luis por su colaboración en la realización de los espectros infrarrojos y de los análisis por absorción atómica en los Laboratorios de CEPSA en Santa Cruz de Tenerife.

Tres de nosotros, A.M., P.G. y F.G.R., dedicamos este trabajo a la memoria del Prof. Benito Rodríguez Ríos y del Lic. Antonio Isidro Hernández Hernández, sin cuyo esfuerzo y entusiasmo investigador, no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

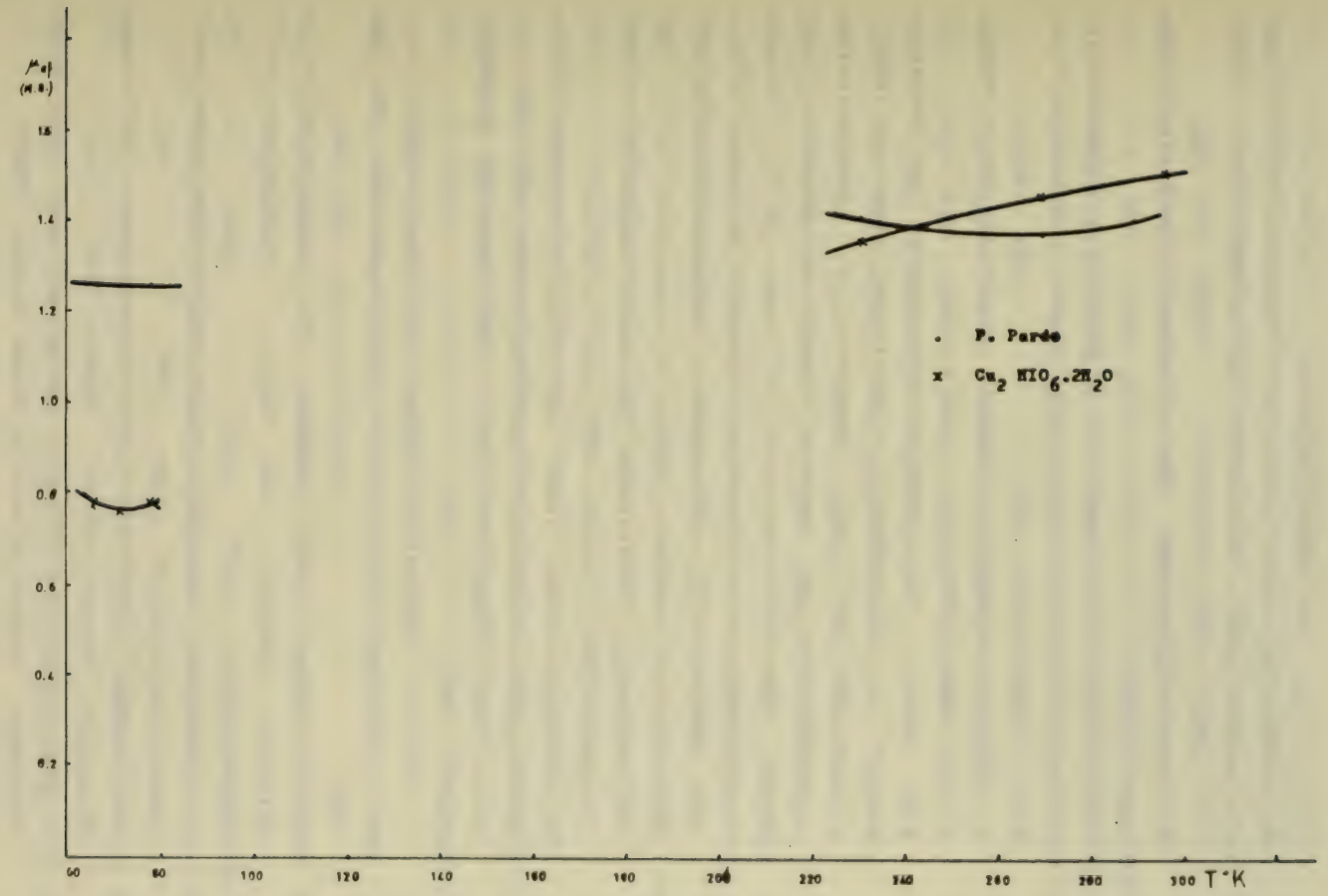

μef (M.B.)
1.5
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
60
80
100
120
140
160
180
200
220
240
260
280
300 T°K
. P. Pardo
x Cu2 HIO6.2H2O

FIG.8

## BIBLIOGRAFIA


(1) J. Beltrán Martínez y B. Rodríguez Ríos, An. Real Soc. Esp. Fis. y Quím. 45(B), 367, (1949); 45(B), 519, (1949); 48(B), 119, (1952); 49(B), 193(1953).

(2) F. González Regalado. Tesis Doctoral. Universidad de La Laguna, 1983.

(3) I.M. Kolthoff, E.B. Sandell, E.J. Meehan y S. Bruckenstein, Análisis Químico Cuantitativo, Librería y Editorial Nigar S.R.L., Buenos Aires, 1972.

(4) G. Charlot y R. Gaugüin, "Dosages Colorimétriques", Masson et Cie. París. 1952.

(5) E.B. Sandell, "Colorimetric Determination of Traces of Metals", Vol. 3, Interscience Publishers, New York, 1959.

(6) Silverstein, M.R. et Bassler, 6; Identification Spectrométrique de Composés Organiques, Masson et Cic., Paris 1968; Fleming, I. Williams, D.H.; Métodos espectroscópicos en Química Orgánica, Ed. Urmo, Bilbao, 1968; Meloan, C.E., Elementaru Infrared Spectroscopy, Macmillan Co., New York, 1963.

(7) L.J. Bellamy, "The Infrared Spectra of Complex Molecules", Chapman and Hall, London, 1975.

(8) B. Rodríguez Ríos. Tesis Doctoral. Universidad de La Laguna, 1956. Contiene bibliografía hasta el año 1956.

(9) Dixon, R.N.; Espectroscopía y Estructura, Ed. Alhambra, Madrid, 1967.

(10) G. Herzberg; Molecular Spectra and Molecular Structure; Vol. I-Diatomic Molecules, 2nd Ed. Van Nostrand, New York 1950.

(11) R.W.B. Pearse y A.G. Gaydon, "The Identification of Molecualr Spectra". 4ª Edition. Chapman and Hall. London.1976.

(12) J.A. Crowther, "Ions, Electrons and Ionizing Radiations". Edward Arnold and Co. London. 1949.

(13) A.G. Gaydon, "Dissociation Energies and Spectra of Diatomic Molecules". Chapman and Hall. London, 1968.

(14) H.S. Massey y E.H.S. Burhop", Electronic, and Ionic Impact Phenomena", Oxford University Press. London. 1952.

(15) C.A. Barth y J. Kaplan, J. Chem. Phys. 26, 506 (1957).
(16) K.R. Jennings y J.W. Linnet, Nature, 182, 597, (1958).
(17) G.C. Dousmanis, T.M. Sanders y C.H. Torones, Phys, Rev. 100, 1735 (1955).
(18) G.I. Finch, Proc, Phys, Soc. London A62, 465, (1949).
(19) T.H. Shaw, "Techniques of Electrical Discharge for Radical Production". Chap by A.M. Bass y H.P. Broida "Formation and Trapping of Free Radicales". Academic Press, New York-London, 1960.
(20) N. Miller, Trans, Faraday Soc. 46, 546 (1950).
(21) H.H. Rust, Angeu. Chemm. 65(10), 249 (1953).
(22) H.Fark, Frequenz 6, 255 (1952).
(23) F.D. Smith, Phil. Mag. 19, 1147 (1935).
(24) H.H. Rust, Angew. Chemm. 65(10), 249 (1953).
(25) Y.I. Frenkel, Zhur. Fiz. Khim. 14(3), 305 (1940).
(26) I.E. El'piner, "Ultrasound Physical, Chemical and Biological Effects "Consultants Bureau, New York, 1964.
(27) C.I. Hochanadel, J. Phys. Chem. 56, 587 (1952).
(28) R.O. Prudhomme y P. Grabar, J. Chim. Phys., 46, 323 (1949).
(29) J. Weiss, Nature, 165, 4201 (1950); 165, 728 (1950).
(30) L. Malatesta, Gazz. Chim. Ital. 71, 467 (1941).
(31) M. Vrtis, Recueil Trav. Chim. Pays-Bas 44, 425 (1925)
(32) L. Malaprade, Comp. Rend. Acad. Sciences 204, 979 (1937).
(33) L. Malatesta. Gazz. Chim. Ital. 71, 580 (1941).
(34) R. Uggla, M. Melnik, O. Orama, M. Klinga y C. Harjulin, Suomen Komistilehti B 45, 323 (1972).
(35) L. Von Jensovsky y M. Ralek, Z. Anorg. Allgem. Chem. 307, 208 (1961); 314, 78 (1962).
(36) M. Arjomand y D.J. Machin, J. Chem. Soc. Dalton Trans. 1061 (1975).
(37) A.T. Casey y S. Mitra, "Theory and Applications of Molecular Paramagnetism", John Wiley and Sons, New York, 1976.
(38) K.B. Yatsimirskii y Lu Czao-Da, Z. Neorg. Chem. 6, 1129 (1961).
(39) R.S. Banerjee y S. Basu, Inorg. Nucl. Chem. 27, 353 (1965).

(40) L. Jensovsky, Coll. Czech. Chem. Comm., 22, 1996 (1967).

(41) L.J. Kirschenbaum, J.H. Ambrus y G. Atkinson, Inorg. Chem. 12, 2833 (1973).

(42) G.L. Cohen y G. Atkinson, Inorg. Chem. 12, 1741 (1964).

(43) A. Balikungern, M. Pelletier y D. Monnier, Inorg. Chim. Acta 22, 7 (1977).

(44) T.R. Griffiths, A.K. Lott y C.R. Symons, Anal. Chem. 31, 1338 (1959).

(45) G.E. Crouthand, A.H. Hayes y D.S. Martin, J. Am. Chem. Soc. 73, 82 (1951).

(46) A.F. Cotton y G. Wilkinson, Advanced Inorganic Chemistry 5ª Ed. John Wiley, 1988.

(47) A.B.P. Lever, Inorganic Electronic Spectroscopy, 2ª Edition, Elsevier, 1984.

(48) Lever, A.B.P., Lewis J. And Nyholm, R.S.; J. Chem. Soc. 4761 (1964).

(49) R.J.P. Williams, J. Chem. Soc., 137 (1955).

(50) R. Näsänen, Acta Chimica Scandonavica, 8, 1587 (1954).

(51) R. Näsänen, R. Ugla, Y. Hirvonen, Skomen Kemistilehti B30, 31 (1957).

(52) A.F. Wells, Química Inorgánica Estructural, Ed. Reverté, Barcelona, 1978.

(53) E.A. Boudreaux and L.N. Moulay, "Theory and Applications of Molecular Paramagnetism", John Wiley and Sons, New York, 1976.

SECCION

# BIOLOGIA

Rev.Acad.Canar.Cienc., II, 71 - 79 (1990)

# AVES GIGANTES EN EL MIOCENO DE FAMARA (LANZAROTE)

F. García-Talavera

Museo de Ciencias Naturales de Tenerife, Aptdo. 853
38.080 Santa Cruz de Tenerife. Islas Canarias.

ABSTRACT

A revision of the calcarenitic fossiliferous deposits in North Lanzarote, including a new locality (Fuente Gusa), with the same characteristics, has been done.

The eggs fragments of Orzola have been considered till the present as belonging to two different types of Ratites: Struthio and Aepyornis, aged around 10 millions years old (SAUER and ROTHE, 1972). Actually, and as the result of our investigations, we arrived to the conclusion that those eggs do not belong to the Ratites, but to the Odontopterygiformes, a group of big flying birds. This order has no present living forms and its fossils are dated as Caenozoic. They were marine seabirds of big size, related to actual Procellariiformes y Pelecaniformes (HARRISON and WALKER, 1976).

The last datations of the lava flows on and below the fossiliferous deposit, give an age of aproximately 6 millions years old (IBARROLA et al., 1988).

KEY WORDS: Fossil eggs, Caenozoic, Odontopterygiformes, North Lanzarote.

## INTRODUCCION

Quizá uno de los enigmas más interesantes que aún quedan por resolver y de gran incidencia sobre el origen de Canarias, sea el de los huevos de aves gigantes encontrados en el Norte de Lanzarote.

La interpretación que se le dió a los fragmentos calcáreos descubiertos en 1953 por BRAVO (com. pers.), en las inmediaciones de Orzola, era de que se trataba de huevos de grandes aves pertenecientes al grupo de las Ratites (ROTHE, 1964) (1). Tras sucesivos análisis, SAUER y ROTHE (1972) (2) llegaron a la conclusión de que en realidad coexistieron en aquella época dos tipos de Ratites claramente diferenciadas: unas pertenecientes al género Struthio como las avestruces actuales y otras emparentadas con las Aepyornis o aves elefantes, extinguidas en el Pleistoceno de Madagascar.

El primer interrogante que se planteó fue el de cómo esas aves no voladoras llegaron hasta allí. Inmediatamente surgieron las controversias entre los cien-

tíficos favorables a la continentalidad de las islas orientales (Lanzarote y Fuerteventura), que sostenían la creencia de que al menos esas islas estuvieron alguna vez unidas al continente africano, explicando de esta manera el poblamiento por parte de ciertos animales, a los que sería imposible cruzar el brazo de mar que las separa del continente africano. En oposición a éstos se encuentran los que creen en la oceanidad de todas las Islas, o lo que es lo mismo, que han surgido del fondo del Océano tras sucesivas erupciones y nunca estuvieron ligadas al Continente.

Nosotros, después de realizar numerosas prospecciones y haber descubierto nuevos fósiles, entre ellos un fragmento de hueso largo, 5 huevos enteros o casi completos y un huevo entero de tortuga terrestre, hemos propuesto, tras haber analizado el problema desde perspectivas paleoecológicas, geológicas, ornitológicas, etc., la hipótesis de que los huevos y huesos encontrados pertenecen al grupo de aves, hoy extinguido, de las Odontopterygiformes y no al de las Ratites como hasta ahora se aceptaba.

## SITUACION GEOGRAFICA

Hasta el momento han aparecido tres yacimientos conteniendo fósiles de estas aves. El primero se encuentra en el N.E. de Lanzarote en las inmediaciones del pequeño pueblo de Orzola, casi en la base del acantilado de Famara, a una altura aproximada de 40 m sobre el nivel del mar y en un pequeño valle encajado en el acantilado, llamado Valle Chico.

Existe otro yacimiento a unos 2 Km al Sur y a algo más de altura, en el lugar denominado Valle Grande, en donde ROTHE (1974) (3) encontró un huevo casi completo. Recientemente, descubrimos en este mismo depósito un huevo entero, fosilizado, de una especie de quelonio (tortuga) similar a los encontrados en Gran Canaria (MACAU, 1958) (4), y Fuerteventura, aunque de tamaño ligeramente inferior.

En 1986 nos encontramos con un nuevo yacimiento en las inmediaciones de la Fuente de Gusa, al otro lado del acantilado de Famara, que se corresponde en altura y características con los de Orzola.

Pensamos que tras una prospección y muestreo más detallados se verá ampliada el área de afloramiento de estos fósiles, haciendo especial énfasis en la búsqueda de material óseo que aportaría, sin duda, valiosos datos sobre la naturaleza de estas aves y despejaría algunas incógnitas sobre su venida y estancia en Lanzarote.

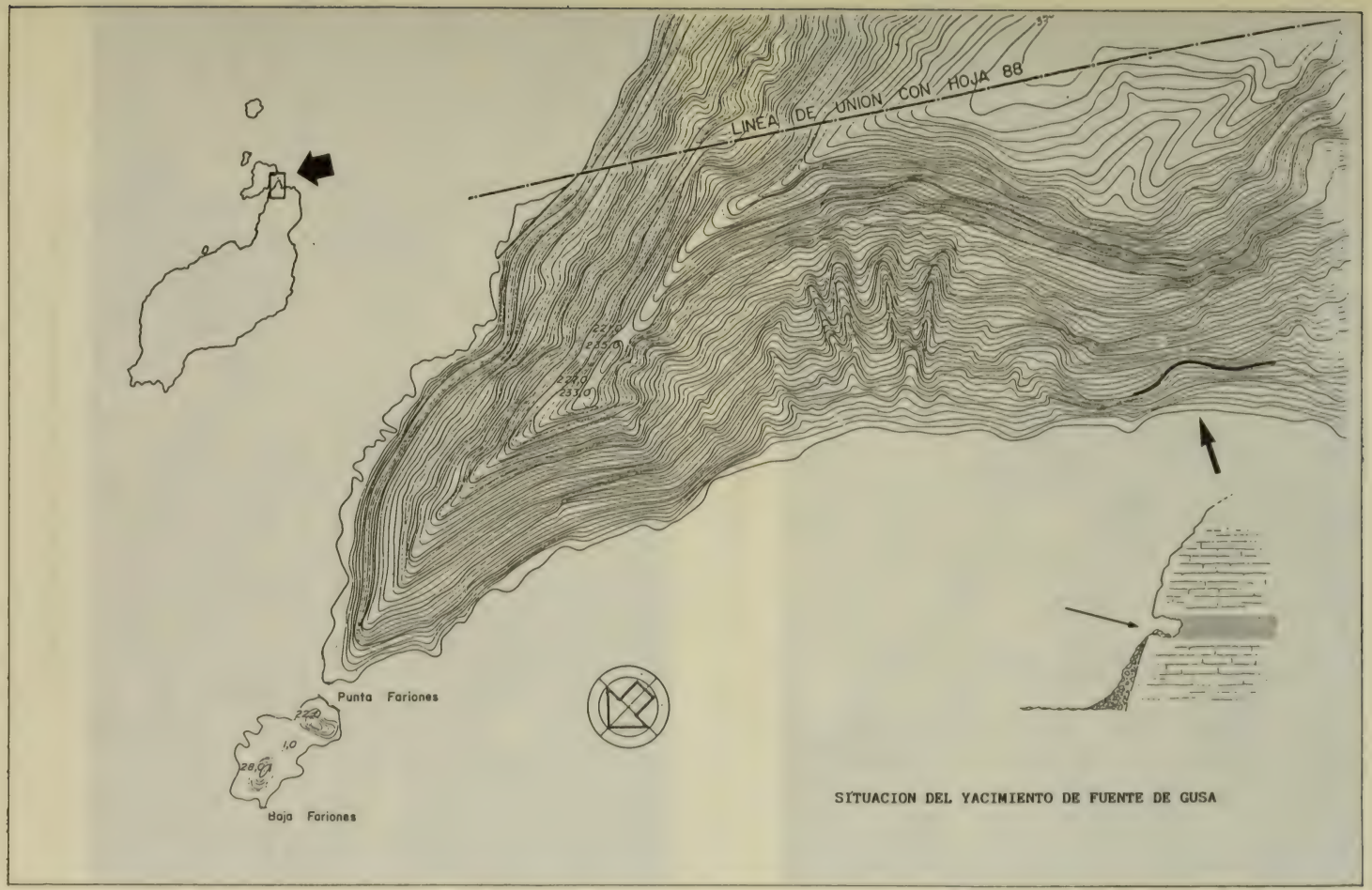

LINEA DE UNION CON HOJA 88
Punta Farione
Baja Farione
SITUACION DEL YACIMIENTO DE FUENTE DE GUSA

FIG. 1. Yacimiento de Fuente Gusa

GEOLOGIA Y PALEONTOLOGIA

El tipo de depósito donde aparecen los fósiles de estas aves se puede interpretar como una calcarenita intercalada entre coladas de lava basáltica y piroclastos, más o menos horizontales, que llegan a alcanzar una altura de 300 m. La potencia de la calcarenita oscila entre 0 y 7 m, siendo máxima en Valle Chico, lugar donde fué objeto de explotación industrial.

Las coladas y piroclastos del macizo de Famara pertenecen a la llamada Serie de Basaltos Antiguos Tabulares y fueron datados por el método de K/Ar, dando una antigüedad entre 6 y 12 millones de años, que se correspondía con la de las Series Antiguas de las demás islas. Recientemente IBARROLA et al. (1988) (5) mediante nuevas dataciones de las coladas inmediatamente inferior y superior al estrato de calcarenita, han fijado la fecha en alrededor de 6 millones de años. Se trata siempre de coladas basálticas horizontales, de pocos metros de espesor, emitidas durante un episodio de volcanismo fisural posterior a la formación de los Complejos Basales de las Islas.

Como el depósito de calcarenita se encuentra en la base de esta formación, podemos asimilarlo al Mioceno Superior convirtiéndose, de esta manera, en el depósito fosilífero terrestre más antiguo de Canarias.

El análisis paleontológico inicial de la calcarenita realizado por ROTHE en 1964 reveló la presencia de fauna y flora marinas pertenecientes a la misma época que se le había asignado por métodos radiométricos y paleomagnéticos (Tortoniense-Sarmatiense).

Un primer análisis paleoecológico muestra que la fauna es litoral de poca profundidad, posteriormente transportada eólicamente, dando lugar a una formación dunar como las que se encuentran actualmente en las islas orientales, con una vegetación y fauna probablemente similares, típicas de este tipo de formaciones eólicas. Cabe destacar la abundante presencia de moluscos gasterópodos terrestres de los géneros Canariella, Leptaxis, Zootecus y Theba (K. GROH, com. pers.).

FIG. 2. Extracción del nido de Valle Chico

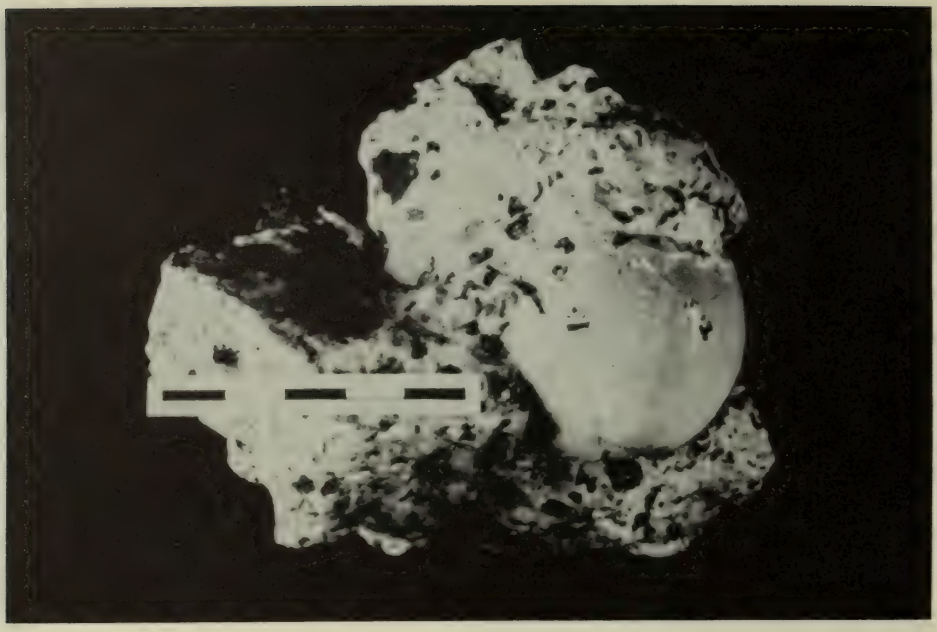


FIG. 3. Huevo de tortuga (Valle Grande)

LAS ODONTOPTERYGIFORMES

Estas aves marinas fósiles, especializadas en la pesca, fueron reconocidas por primera vez y descritas por OWEN en 1873 (6). La característica fundamental que llamó la atención de dicho autor fueron las prolongaciones óseas de las mandíbulas a modo de dientes, de ahí el nombre asignado a este orden. Al principio se pensó que se trataba de una especie aberrante, pero más tarde, con el descubrimiento de gran número de fósiles en diferentes localidades, se cambió el status taxonómico de estas aves, asignándoseles definitivamente el rango de orden, que comprende cuatro familias.

Su distribución estratigráfica va desde el Eoceno Inferior hasta el Plioceno Superior. Asimismo, la distribución geográfica también debió ser amplia, ya que se han encontrado sus restos en Europa, Norte de Africa, Norteamérica y posiblemente Nueva Zelanda.

Estas aves marinas llegaron a alcanzar más de 6 m de envergadura, como es el caso de Odontornis, correspondiendo estos gigantescos tamaños a sus últimos estadíos evolutivos del Mioceno y Plioceno. Su extinción puede ser atribuida a las peculiares modificaciones de la mandíbula, pero el hecho de que hayan

coexistido con un amplio rango de otros tipos de aves, indica un éxito en la evolución del grupo.

La característica forma de su cráneo y del pico les situa como eslabón entre las Pelicaniformes y las Procellariiformes (HARRISON and WALKER, 1976) (7). Podemos imaginarnos a estas aves, por lo tanto, formando colonias en zonas costeras de los mares cenozoicos ricos en nutrientes donde la pesca era abundante.

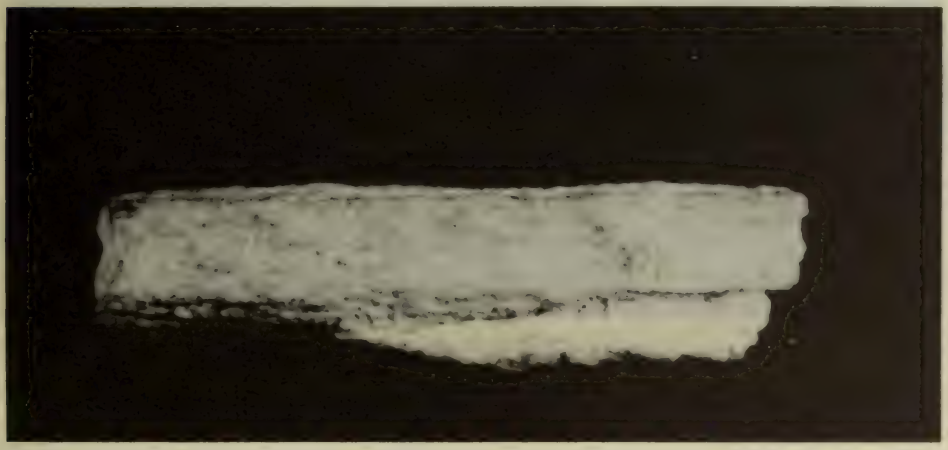
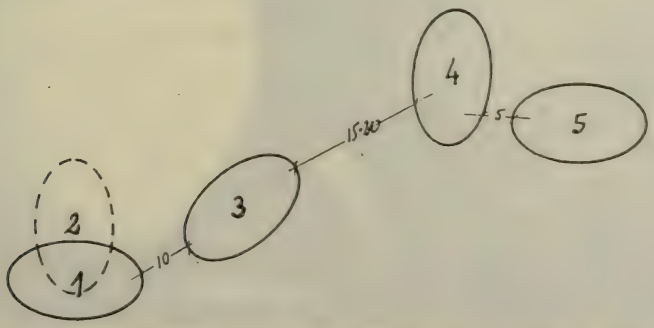


FIG. 4. Fragmento de hueso largo

1. Vacio, fragmentado
2. Completo, relleno de sedimento (En nivel inferior a 1)
3. Vacio, fragmentos múltiples
4. Vacio, fragmentos múltiples
5. Vacio, fragmentado




Posición esquemática de los huevos en un nido encontrado en Valle Chico (Distancias aproximadas en cm. Situación en planta)

FIG. 5. Huevos 4 y 5 del nido de Valle Chico

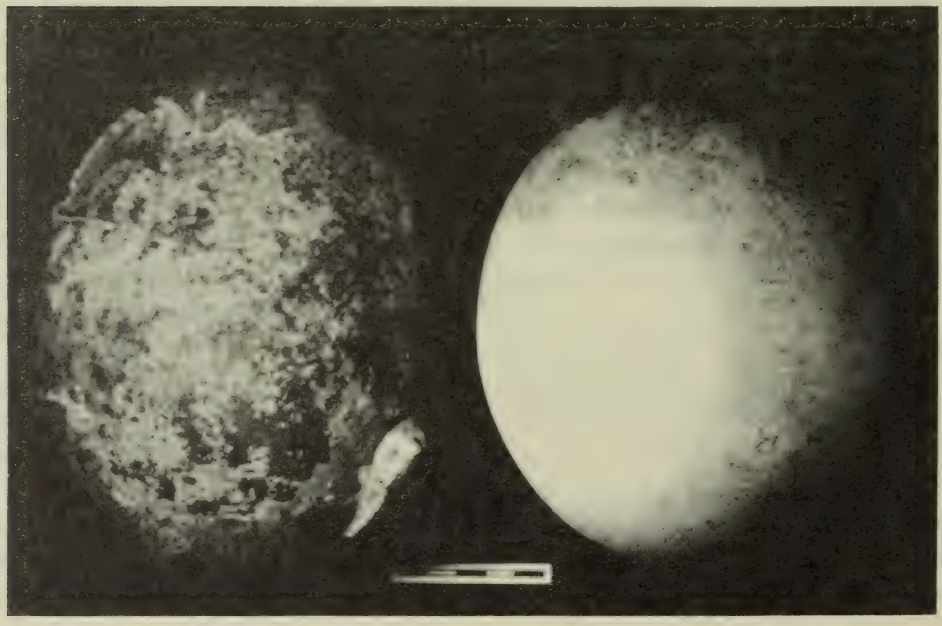


FIG. 6. Comparación con un huevo de avestruz (derecha)

## CONCLUSIONES

Nuestra hipótesis, como ya hemos explicado, es que se trataba de aves marinas de gran envergadura, emparentadas con los pelícanos y cormoranes actuales, que posiblemente habían establecido colonias de nidificación en las incipientes Islas Orientales, en una época en la que el mar de la zona era muy rico en pesca. A estas aves voladoras no les sería difícil cubrir el estrecho brazo de mar que entonces separaba a las primitivas Islas Orientales del Continente Africano.

De ninguna manera creemos sostenible la tesis de SAUER y ROTHE sobre la coexistencia, en un territorio tan pequeño, de dos géneros de Ratites tan diferentes como son las avestruces y las aves elefante. Tampoco compartimos la idea de la continentalidad de las Islas Orientales, que se basa fundamentalmente en la presencia en las mismas, de esas grandes aves no voladoras.

En nuestra opinión, el problema hay que enfocarlo con la perspectiva temporal adecuada a unas condiciones geográficas y medio-ambientales diferentes a las actuales, tanto en las Islas como en el Continente , que permitieron la arribada a las mismas de grandes tortugas terrestres, las cuales llegaron a convivir con las aves gigantes. La existencia, hoy en día, de estos quelonios en Galápagos y Aldabra es explicada por otros medios, sin tener que recurrir a la continentalidad de dichos archipiélagos.

En resumen, no creemos que fueran Ratites no voladoras y corredoras y sí Odontopterygiformes voladoras y pescadoras, que sabemos existieron en las costas del Norte de Africa hasta finales del Terciario.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Gobierno Autónomo de Canarias. Mi más sincero agradecimiento al equipo colaborador del Proyecto, en especial a Rafael Paredes, Lázaro Sánchez-Pinto, Efraín Hernández y Mercedes Martín.

## BIBLIOGRAFIA

(1) P. Rothe: Fossile Strausseneier auf Lanzarote. Natur und Museum, 94, 175-218 (1964).
(2) E.G. Sauer y P. Rothe: Ratite Eggshell from Lanzarote, Canary Islands. Science, 172, 43-45 (1972).
(3) P. Rothe: Canary Islands. Origin and Evolution. Naturwissenschaften, 61, 526-533 (1974).
(4) F. Macau: Contribución al estudio del Mioceno Canario. Bol. Real. Soc. Esp. Hist. Nat. 56, 477-486 (1958).
(5) E. Ibarrola et al.: Geocronología de las series volcánicas neógenas de Lanzarote. II Congreso Geológico de España. Simposio sobre volcanismo, Granada 1988, pp 345-48.
(6) R. Owen: Description of the skull of a dentigerous bird (Odontopteryx toliapica) from the London Clay of Sheppey. Q. Journ. Geol. Soc. Lond., 29, 511-522 (1873).
(7) J.O. Harrison y C.A. Walker: A review of the bony-toothed birds (Odontopterygiformes): with descriptions of some new species. Tertiary Research, London, 1976, 72 pp.

Rev.Acad.Canar.Cienc., II, 81 - 92 (1990)

# LOS STAPHYLINOIDEA (COLEOPTERA) SUBTERRANEOS DE CANARIAS: CONSIDERACIONES ZOOGEOGRAFICAS

Juan José Hernández Pacheco

Museo de Ciencias Naturales de Tenerife, Apdo. 853
38.080 Santa Cruz de Tenerife. Islas Canarias

ABSTRACT

A faunistic list of the underground staphylinid beetles from Canary Islands is shown. A total of 25 species (from 9 different genera) are presented, of which 1 is a muscicolous species, 7 are humicolous, 7 edaphobites and 10 troglobites. The degree of endemims is as high as 96%. The distribution of each species is given and, finally, a brief discussion of the major adaptative characters as well as an analysis of their biogeographical relationships is included.

KEY WORDS: Staphylinid, edaphobite, troblobite, zoogeography, Canary Islands.

## INTRODUCCION

Desde que se iniciaron los estudios bioespeleológicos de las cuevas terrestres de Canarias, hace ya seis años aproximadamente, han sido más de 60 las especies troglobias descubiertas en este archipiélago (1). Los muestreos biológicos, en principio realizados exclusivamente en el interior de las cuevas, se han extendido últimamente al denominado Medio Subterráneo Superficial Volcánico (2). Esto ha permitido descubrir nuevas especies endogeas o edáficas de gran interés, además de espectaculares troglobios en terrenos que por su antigüedad geológica carecen de cuevas.

Estas especies pertenecen a órdenes diversos: Pseudoscorpiones, Araneidos, Anfípodos, Isópodos, Quilópodos, Dermápteros, Blátidos, Heterópteros, Homópteros y Coleópteros (1). De estos órdenes, es sin duda el de los coleópteros el que muestra un mayor número de formas troglobias, pertenecientes todas ellas a la familia Carabidae y a la superfamilia Staphylinoidea. Tradicionalmente, los Staphylinoidea se han considerado "pobres" en especies troglobias, si los comparamos con familias como Carabidae y Catopidae. Es éste uno de los motivos por los que resulta de enorme interés el descubrimiento en Canarias de tantas especies de Staphylinoidea de vida estrictamente subterránea.

En este trabajo se muestra por vez primera una relación de todas estas especies, con indicación de su distribución insular y comentarios sobre sus características adaptativas y sus relaciones zoogeográficas.

## LOS ESTAFILINIDOS SUBTERRANEOS DE CANARIAS

La superfamilia Staphylinoidea está representada en Canarias por un total de 255 especies, siendo actualmente objeto de un extenso estudio taxonómico que, sin duda, aportará el hallazgo de nuevos taxones y una mejor información sobre el hábitat y la distribución de cada una de ellas.

De estas especies muchas habitan el suelo, ocupando biotopos diversos. Así, hay formas intertidiales, rupícolas, muscícolas, humícolas y otras que ocupan los niveles más profundos del medio subterráneo. Estas últimas pueden en principio clasificarse en especies endogeas o edáficas y en troglobias. Las primeras habitan desde los niveles del suelo -justo bajo la capa de humus superficial- hasta grietas e intersticios a mayor profundidad, llegando al Medio Subterráneo Superficial (MSS), así como al interior de las cuevas localizadas en el horizonte C. Las especies troglobias coexisten con muchas especies endogeas en el MSS, pero están altamente especializadas para explotar los recursos en el interior del sistema de huecos interconectados de tamaño medio (mesocavernas) y colonizar las cuevas adyacentes (macrocavernas) (3). Considerando únicamente las formas muscícolas, humícolas, endogeas y troglobias, el número de especies asciende a un total de 25, agrupadas en 9 géneros (TABLA I). De ellas, 1 se considera muscícola, 7 humícolas, 7 edáficas y 10 troglobias. Según su grado de adaptación morfológica a la vida subterránea (4), 3 son epimorfas, 8 ambimorfas y 14 troglomorfas. Con la única excepción de Scopaeus (Anomoscopaeus) gracilis (Sperk., 1835), cuya área de distribución comprende la Europa Central y Occidental, las restantes son exclusivas de Canarias, lo que supone un porcentaje de endemismos del 96%.

### SITUACION TAXONOMICA

Considerando a los Estafilinoideos como una gran superfamilia, en el sentido dado por Jeannel y Jarrige (1949), los géneros con representación subterránea en Canarias se incluyen en diferentes familias taxonómicas, tal como se indica a continuación:

Superfamilia Staphylinoidea
- Familia Aleocharidae
  - Subfamilia Bolitocharinae
    - Tribu Bolitocharini
      - Subtribu Bolitocharae
        - Género SIPALIA Mulsant et Rey
  - Subfamilia Myrmedoninae
    - Tribu Myrmedoniini
      - Subtribu Myrmedoninae
        - Género APTERANOPSIS Jeannel

Subfamilia Oxypodinae

Tribu Athetini

Subtribu Geostibae

Género GEOSTIBA Thomson

Familia Oxytelidae

Subfamilia Osoriinae

Género LUSITANOPSIS Coiffait

Género GEOMITOPSIS Scheerpeltz

Familia Staphylinidae

Subfamilia Staphylininae

Tribu Staphylinini

Género ATLANTOGOERIUS Coiffait

Subfamilia Leptotyphlinae

Tribu Entomoculini

Género ENTOMOCULIA Croissandeau

Subfamilia Paederinae

Tribu Lathrobiini

Subtribu Lathrobii

Género DOMENE Fauvel

Tribu Stilicini

Género SCOPAEUS Erichson

## CARACTERISTICAS ADAPTATIVAS

Tanto los coleópteros endogeos como los troglobios desarrollan todas sus fases de vida en el suelo, y evolutivamente han mantenido la constancia de sus requerimientos ecológicos mediante un aumento de su penetración en el medio subterráneo. La necesidad de excavar en un sustrato terroso o de explorar a través de diversos tipos de fisuras y grietas del suelo, les ha llevado a desarrollar una serie de adaptaciones propias al particular medio que ocupan. En este sentido existen caracteres adaptativos comunes a ambos tipos de animales, al tiempo que otros parecen ser exclusivos de las formas endogeas, candidatos potenciales a una especiación troglobia.

Adaptaciones comunes a endogeos y troglobios.

El ojo se reduce o desaparece completamente. En algunos endogeos microftalmos persiste una cicatriz ocular. En Osoriini y Entomoculini esta cicatriz ha desaparecido completamente, pero pesiste en troglobios como Apteranopsis junoniae Hern. y Martín.

La desaparición del ojo generalmente está acompañada de una despigmentación corporal, que llega a ser total en aquellas especies evolutivamente más antiguas.

El ala membranosa se atrofia o desaparece. En edafobios como Osoriini y Leptotyphlinae no queda el menor resto de vestigio alar.

| GENERO | ESPECIE | DISTRIBUCION H | P | G | T | C | F | L | ADAPTACION ECOLOGICA | ADAPTACION MORFOLOGICA | AREA ZOOGEOGRAFICA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Apteranopsis | canariensis Oromí y Martín, 1984 | | | | X | | | | TROGLOBIA | TROGLOMORFA | ENDEMICA |
| | hephaestos Hdez. y García, en prensa | | X | | | | | | TROGLOBIA | AMBIMORFA | ENDEMICA |
| | junoniae Hdez. y Martín, en prensa | | X | | | | | | TROGLOBIA | AMBIMORFA | ENDEMICA |
| | outereloi Gamarra y Hdez., en prensa | | | | X | | | | TROGLOBIA | TROGLOMORFA | ENDEMICA |
| | palmensis Hdez. y Martín, en prensa | | X | | | | | | TROGLOBIA | TROGLOMORFA | ENDEMICA |
| | tanausui Hdez. y Martín, en prensa | | X | | | | | | TROGLOBIA | TROGLOMORFA | ENDEMICA |
| Atlantogoerius | anophthalmicus Hdez. y Aguiar, 1988 | | | | X | | | | ENDOGEA | TROGLOMORFA | ENDEMICA |
| Domene | alticola Oromí y Hdez., 1986 | | | | X | | | | TROGLOBIA | TROGLOMORFA | ENDEMICA |
| | benahoarenis Oromí y Mart., en prensa | | X | | | | | | TROGLOBIA | AMBIMORFA | ENDEMICA |
| | jonayi Hdez. y Medina, en prensa | | | X | | | | | TROGLOBIA | TROGLOMORFA | ENDEMICA |
| | vulcanica Oromí y Hdez., 1986 | | | | X | | | | TROGLOBIA | TROGLOMORFA | ENDEMICA |
| | sylvatica Hdez. y Oromí, en prensa | | | | X | | | | ENDOGEA | AMBIMORFA | ENDEMICA |
| Entomoculia | canariensis Outerelo (1980) | | | X | | | | | ENDOGEA | TROGLOMORFA | ENDEMICA |
| | lauricola Outerelo y Hdez., en prensa | | | | X | | | | ENDOGEA | TROGLOMORFA | ENDEMICA |
| Geomitopsis | franzi Coiffait, 1978 | | | | X | X | | | ENDOGEA | TROGLOMORFA | ENDEMICA |
| Geostiba | aranensis Israelson, 1985 | | | X | | | | | HUMICOLA | AMBIMORFA | ENDEMICA |
| | franzi (Palm, 1976) | | | | X | | | | HUMICOLA | AMBIMORFA | ENDEMICA |
| | palmi Franz, 1981 | | X | | | | | | HUMICOLA | AMBIMORFA | ENDEMICA |
| | teydensis (Palm, 1975) | | | | X | | | | HUMICOLA | AMBIMORFA | ENDEMICA |
| Lusitanopsis | tenerifensis Outerelo, en prensa | | | | X | | | | HUMICOLA | TROGLOMORFA | ENDEMICA |
| Scopaeus | bifossicapitata (Out. y Oromí, 1987) | | | X | X | | | | ENDOGEA | TROGLOMORFA | ENDEMICA |
| | gracilis (Sperk., 1835) | | | | X | X | | | HUMICOLA | EPIMORFA | EUROPEA |
| | n. sp. (*) | | | | | X | | | ENDOGEA | TROGLOMORFA | ENDEMICA |
| Sipalia | lanzarotensis Palm, 1975 | | | | | | | X | HUMICOLA | EPIMORFA | ENDEMICA |
| | muscicola Wollaston, 1864 | | | | | X | | | MUSCICOLA | EPIMORFA | ENDEMICA |

TABLA I.- Relación de los Staphylinoidea subterráneos de Canarias, con indicación de su distribución insular, adaptación ecológica, morfológica y área zoogeográfica: H= El Hierro; P= La Palma; G= La Gomera; T= Tenerife; C= Gran Canaria; F= Fuerteventura; L= Lanzarote; (*)= nueva especie aún sin describir.

Adaptaciones propias de los endogeos.

Los coleópteros endogeos excavadores presentan el cuerpo con una forma generalmente cilíndrica o subcilíndrica.

Muestran asimismo un estrechamiento más o menos acusado de la base del protórax, lo que le permite al insecto hacer grandes movimientos circulares y facilita su locomoción en los insterticios del suelo o en las microgalerías de las raíces muertas (5). Esta adaptación está bien representada en los estafilínidos Osoriini y Leptotyphlinae (6).

Aunque la talla corporal es variable, predominan especies pequeñas, con una longitud corporal de pocos milímetros. Los edafobios de gran tamaño se consideran excepcionales y, al contrario que las especies pequeñas, suelen ser microftalmas e incompletamente despigmentadas (6). En la fauna subterránea de Canarias esta tendencia está bien representada en las especies endogeas de Tenerife, Atlantogoerius anophthalmicus Hdez. y Aguiar y Domene sylvatica Hdez. y Oromí, que con unas longitudes corporales de 11.1 y 8 mm, respectivamente, son inferiores a sus congéneres canarios y sensiblemente superiores a otros endogeos de las islas.

En ciertos grupos se produce un mayor desarrollo de la cabeza, cuyo borde anterior se hace más fuerte mediante un aumento de la quitinización (5). Atlantogoerius anophthalmicus, único endogeo del género, muestra esta característica (FIG. 1).

Existe una tendencia general al acortamiento de los apéndices. El acortamiento de las patas suele ir acompañado por una reducción del número de artejos del tarso. Como ejemplo citemos que los Leptotyphlinae poseen tarsos de 2 ó 3 artejos, mientras que en otros Staphylinidae existen 4 ó 5 artejos. Las antenas presentan una estructura particular en los edafobios, ya que se tiende a una reducción del número de artejos así como a una modificación estructural de algunos de ellos. El género Entomoculia posee 10 artejos, en lugar de los 11 típicos de la familia. En Geomitopsis los artejos 5 y 7 son más gruesos que los artejos 4,6 y 8. Esta tendencia se da en otros coleópteros endogeos, lo que indica que se trata de un notable fenómeno de convergencia adaptativa (6).

Es general en los estafilínidos edáficos un notable acortamiento de los élitros, en relación a las formas epígeas próximas. En los Leptotyphlinae hay una tendencia evolutiva a la desaparición total de la articulación escapular. Esto se considera el resultado de una evolución muy larga del grupo, hasta el punto de considerarse a los Leptotyphlinae la línea más antigua de coleópteros endogeos (6).

## CONSIDERACIONES ECOLOGICAS Y ZOOGEOGRAFICAS

Las especies muscícolas, humícolas y endogeas.

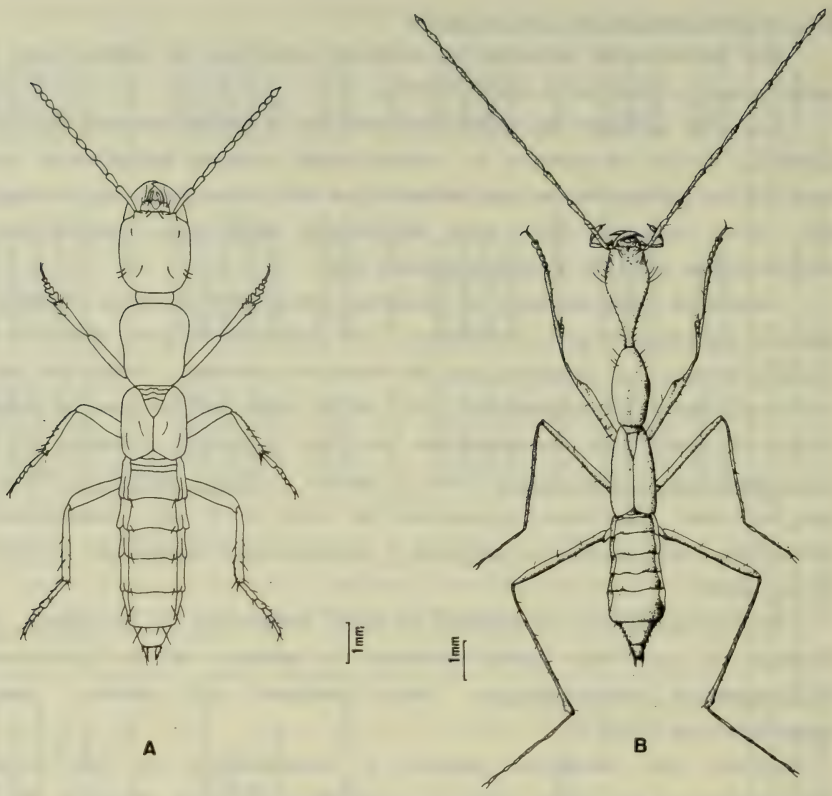



FIG. 1.- A: Atlantogoerius anophthalmicus, típico estafilínido endogeo. B: Domene vulcanica, el más espectacular de los estafilínidos troglobios de Canarias.

En Atlantogoerius nos encontramos frente a un género endémico de Canarias y muy próximo a Ocypus, del que Coiffait lo separó en 1956. Está constituido por 6 especies (7), de las que A. anophthalmicus es la más pequeña, la más despigmentada y la única anoftalma del género. Fue capturada bajo raíz a 20 cm de profundidad en zona de laurisilva y es una típica especie endogea (FIG. 1).

El género Sipalia se distingue de otros Bolitocharae por sus élitros cortos (subiguales al pronoto). La mayor parte de las especies de este género son fungícolas, ya que habitan hongos frescos de los que la larva y los adultos se alimentan (8). En Canarias se han citado 4 especies: S. franzi (Palm), S. lanzarotensis Palm, S. muscicola Wollaston y S. teydensis (Palm), de las que la primera es completamente ciega. Recientemente, S. franzi y S. teydensis se consideran pertenecientes al género Geostiba. Con la única excepción de S. muscicola, el resto se considera humícola.

Geostiba es un género del que se han citado 80 especies para la Región Paleártica y sólo unas pocas para la Región Neártica. No se han citado especies

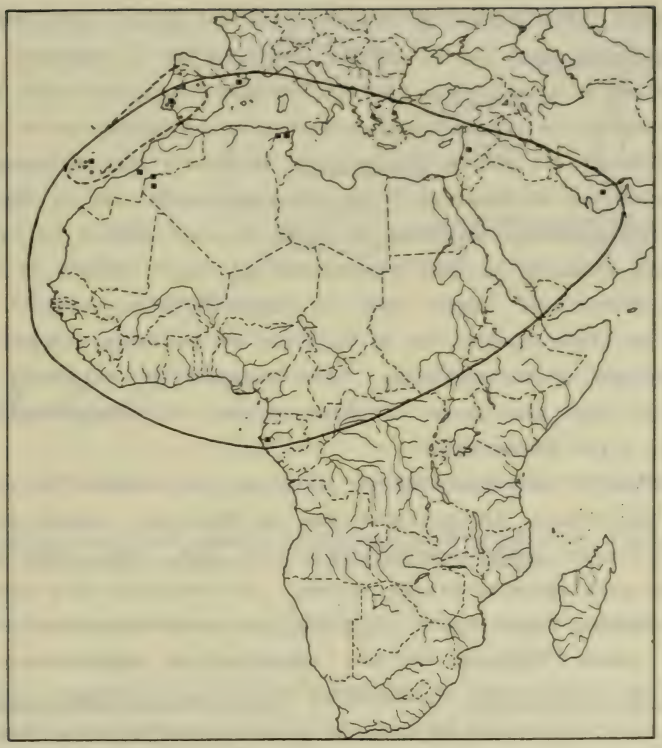


FIG. 2.- Distribución de los dos géneros de Osoriinae con representantes canarios: en trazo discontínuo (*) el género Lusitanopsis; en trazo contínuo ( • ) el género Geomitopsis.

de otras zonas zoogeográficas (8). Este género, junto a otros afines, constituyen un grupo de Athetini con ojos pequeños, élitros cortos (y probablemente sin alas), hipomero completamente expuesto y antenas con los segmentos 4-10 transversos. Según Israelson (9), G. teydensis y G. aranensis forman un grupo distintivo con varios caracteres interesantes en común. La primera parece ocupar el bosque de pinos y las zonas montanas, mientras que la segunda es más exclusiva de la laurisilva (9).

La subfamilia Osoriinae ha experimentado, en la escala evolutiva, una colonización del suelo relativamente reciente, por lo que hay un gran número de especies que viven en ambientes epígeos y que son potenciales colonizadores del medio subterráneo (5). El grupo, en general, mantiene una fuerte capacidad de dispersión. Esta subfamilia está representada en Canarias por dos especies endémicas; Geomitopsis franzi Coiffait y Lusitanopsis tenerifensis Outerelo. Ambas se han citado únicamente de Tenerife y opupan hábitats similares (bajo hojarasca a pocos centímetros de profundidad). No obstante, recientemente se han recolectado ejemplares de Geomitopsis en Gran Canaria y Tenerife entre 30 y 50 cm

de profundidad. Esto supone la primera cita del género para Gran Canaria. El género Geomitopsis queda por el momento compuesto por 12 especies (10) y, con la única excepción de G. chilensis Coiffait et Sáiz citada de Chile, su distribución queda limitada a la Cuenca Mediterránea y a la mitad norte del Continente Africano (FIG. 2). El género Lusitanopsis lo constituyen únicamente 7 especies (11), distribuidas en Canarias y la mitad occidental de la Península Ibérica (FIG. 2). Probablemente la falta de citas de este género en la zona norte o noroccidental africana se deba simplemente al menor número de muestreos allí realizados. Vemos por tanto cómo la representación canaria de Osoriinae constituye un claro ejemplo de la relación de la fauna endogea con la de la Europa Tirrénica y Norteafricana. Esta relación se evidencia igualmente si analizamos el otro gran grupo de Staphylinidae con representación endogea en Canarias; la tribu Entomoculini.

La subfamila Leptotyphlinae es un grupo muy antiguo de microcoleópteros edáficos y predadores. Al contrario que los Osoriini, tienen una capacidad de dispersión activa prácticamente nula, lo que les hace particularmente interesantes para estudios biogeográficos. La subfamilia está constituida por 5 tribus ampliamente repartidas (FIG. 3), de las que en Canarias la representación del grupo queda limitada a dos especies de Entomoculini; Entomoculia (Stenotyphlus) canariensis Outerelo y Entomoculia (Stenotyphlus) lauricola Outerelo y Hdez. La primera es endémica de La Gomera, mientras que la segunda lo es de Tenerife. Ambas ocupan un hábitat similar, en el suelo del húmedo bosque de laurisilva y, en el caso de E. lauricola, se ha recolectado junto a Geomitopsis franzi a 50 cm de profundidad. Las dos especies canarias muestran una serie de caracteres en común que las alejan sensiblemente de las restantes especies de Entomoculia, y las aproximan mucho a otro género de la tribu, Mesotyphlus Coif-

FIG. 3.- Distribución de la tribu Entomoculini, con indicación de los géneros Entomoculia (●) y Mesotyphlus (■), parientes más próximos de las especies canarias.

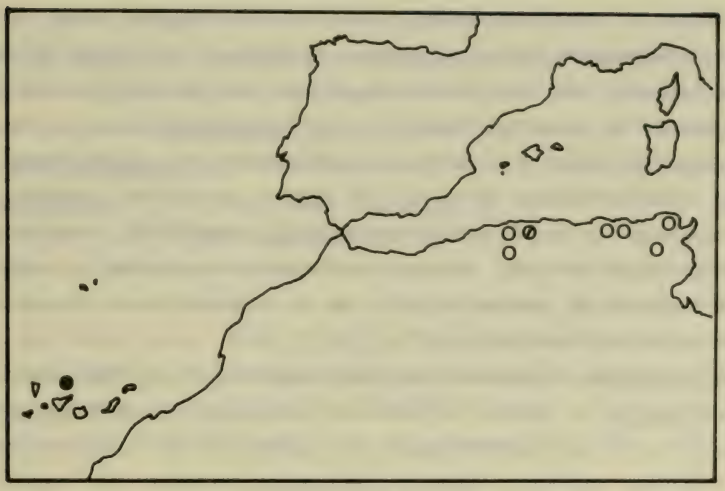


FIG. 4.- Distribución del género Apteranopsis: ● = especies troglobias; O = especies endogeas; Ø = especie mirmecófila.

fait. Probablemente las especies de Entomoculia que se puedan encontrar en las Islas Canarias constituyan un subgénero o incluso un género nuevo, intermedio entre Entomoculia y Mesotyphlus (12). En todo caso la distribución de la tribu en general, o de estos dos géneros afines en particular, se limita a la Cuenca Mediterránea (FIG. 3), donde probablemente tuvieron su origen los ancestros de estas formas canarias.

El género Scopaeus está actualmente representado en las Islas por S. gracilis y S. bifossicapitata (Outerelo y Oromí). La primera especie, común a Tenerife y Gran Canaria, no muestra una acusada adaptación a la vida subterránea. La segunda fue descrita en 1987 como perteneciente al género Domene (13), pero en 1989 es reconsiderada su posición taxonómica y se incluye en Scopaeus. Se trata de una especie típicamente endogea, muy emparentada con otra anoftalma recientemente descrita de la Península Ibérica (14), con quien parece compartir una serie de caracteres intermedios entre los géneros Domene, Scopaeus y Scotonomus. Esto ha llevado a su inclusión en un nuevo taxón subgenérico de Scopaeus, denominado Anophcopaeus (14). Una tercera especie, aún sin describir, ha sido recolectada recientemente en la isla de Gran Canaria.

Las especies troglobias.

El género Apteranopsis posee actualmente 13 especies, de las que 7, en su mayor parte endogeas, tienen una distribución limitada a la Berberia Oriental (Argelia y Túnez), y las 6 restantes son en su totalidad formas troglobias de

Canarias (FIG. 4). Nos encontramos ante un espectacular caso de radiación evolutiva. Se desconocen parientes epigeos o endogeos del género en las Islas y las formas canarias son las únicas troglobias del género. Dos de estas seis especies habitan la isla de Tenerife (A. canariensis Oromí y Martín y A. outereloi Gamarra y Hdez.), y las cuatro restantes (A. hephaestos Hdez. y García, A. junoniae Hdez. y Martín, A. palmensis Hdez. y Martín y A. tanausui Hdez. y Martín) comparten el medio subterráneo de La Palma (15), una isla con una antiguedad geológica de sólo 1.4 a 2 millones de años (16). Posiblemente se produjo una especiación insular a partir de la colonización de formas ancestrales edáficas de morfología ambimorfa (17).

Los estafilínidos troglobios más espectaculares de los hallados en Canarias pertenecen a Domene, un género de Paederinae ampliamente distribuido en la Región Paleártica (FIG. 5). La representación del género en las Islas asciende ya a 5 especies, de las que sin duda D. vulcanica muestra el mayor grado de troglomorfismo (FIG. 1). Afortunadamente, la nueva técnica de muestreo en el MSS, desarrollada actualmente por A. L. Medina (2) ha permitido descubrir una interesante especie troglobia recientemente descrita de la isla de La Gomera, D. jonayi. Esto es particularmente interesante si consideramos que, debido a la antiguedad de dicha isla y a la falta de erupciones históricas y subhistóricas, prácticamente no existen cuevas donde poder estudiar la fauna troglomorfa que sin duda habita su subsuelo. Otra especie troglobia, aunque de morfología ambimorfa, habita la isla de La Palma, D. benahoarensis Oromí y Martín. De Tenerife se han descrito las tres especies restantes, dos troglobias; D. vulcanica y D. alticola Oromí y Hdez., y una endogea; D. sylvatica Hdez. y Oromí. Vemos que, contrariamente a lo ocurrido en Apteranopsis, en las especies canarias de Domene

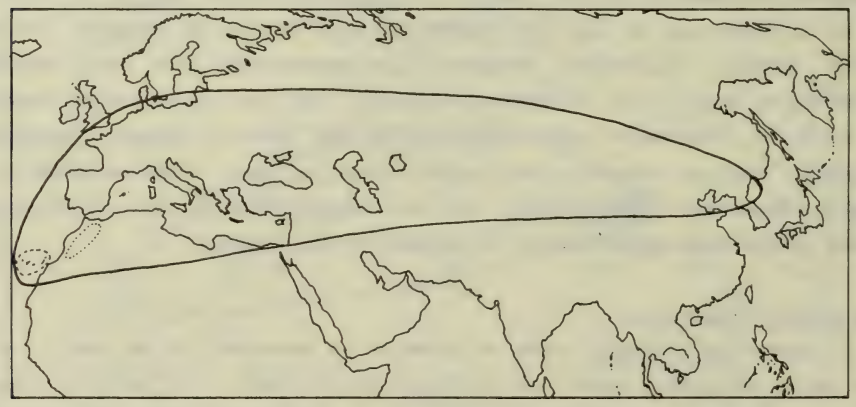


FIG. 5.- Distribución mundial del género Domene (trazo contínuo), con indicación de los dos subgéneros con formas troglobias: Spelaeomene (trazo punteado) y Canariomene (trazo discontínuo).

sí existe una forma endogea, aunque el alto grado de adaptación morfológica de especies como D. vulcanica, D. alticola y D. jonayi revelan un antiguo proceso de evolución insular. Todas estas especies canarias, tanto las troglobias como la endogea, muestran un acusado parentesco y constituyen un subgénero endémico denominado Canariomene. Las otras especies troglobias del género (D. camusi Peyerh., D. cantonsi Esp. y D. aurouxi Esp.) tienen una distribución limitada a Marruecos y forman el subgénero Spelaeomene (18, 19, 20) (FIG. 5).

Por último, si atendemos a la clasificación de los troglobios propuesta por MARTIN et al. (1), en relación a sus afinidades en el medio superficial, comprobamos que todos estos estafilínidos troglobios podrían ser clasificados como "relícticos insulares", perteneciendo las especies de Apteranopsis al grupo 2 y las de Domene al grupo 1.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración prestada por G. Ortega, A.L. Medina y J.J. Bacallado (Museo de Ciencias Naturales de Tenerife) en la corrección del manuscrito original.

BIBLIOGRAFIA

(1) J.L.Martín; I.Izquierdo et P.Oromí: Sur les relations entre les troglobies et les especes epigees des Iles Canaries. Mémoires de Biospéologie, Tome XVI, 25-34 (1989)

(2) P.Oromí; A.L.Medina and M.L.Tejedor: On the existence of a superficial underground compartment in the Canay Islands. Actas 9º Congreso Internacional de Espeleología. Barcelona, Vol. 2, 147-151 (1986)

(3) F.Howarth: The tropical cave environment and the evolution of troglobites. Actas 9º Congreso Internacional de Espeleología. Barcelona, Vol. 2, 153-155

(4) K.Christiansen: Proposition pour la classification des animaux cavernicoles. Spelunca, 2, 76-78 (1962)

(5) F.Sáiz: Biogeography of soil beetles in Mediterranean Regions. Ecological Studies. Analysis and Synthesis. New York, 7, 285-294 (1973)

(6) H.Coiffait: Les adaptations des coléoptères édaphobies. Internat. KongreB. Entomol. Wien, 1, 378-382 (1960)

(7) J.J.Hernández y A.Aguiar: Una nueva especie de Atlantogoerius endogeo de Tenerife (Islas Canarias). Fragm. Entomol., Roma, 22(1), 85-92 (1978)

(8) C.H.Seevers and L.H.Herman: A generic and tribal revision of the North American Aleocharinae (Coleoptera, Staphylinidae). Fieldiana Zoology, Vol. 71, 289 pp. (1978)

(9) G.Israelson: Notes on the beetle-fauna of Gomera (Canary Is.), with descriptions of new species and an appendix on Quedius angustifrons Wollaston of

Gran Canaria. Vieraea, Vol. 15(1-2), 143-155 (1985)

(10) H.Coiffait: Geomitopsis franzi, n. sp. les Iles Canaries. Nouv. Rev. Ent., VIII, 1, 45-46 (1978)

(11) R.Outerelo: El género Lusitanopsis nuevo en Canarias, con una nueva especie, L. tenerifensis (Col., Staphylinidae). Rev. Soc. Real Acad. Cienc. Fis. Nat. Madrid, (en prensa)

(12) R.Outerelo y J.J.Hernández: Entomoculia (Stenotyphlus) lauricola, n. sp. de Tenerife, Islas Canarias (España) (Coleoptera: Staphylinidae). Ann. Soc. ent Fr. (N.S.), 25(4): 515-520 (1989)

(13) R.Outerelo y P.Oromí: Domene bifossicapitata n. sp. endogea de las Islas Canarias (Coleoptera: Paederinae). Actas de la VIII Bienal de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Pamplona, 21-24 Sept., 135-142 (1987)

(14) R.Outerelo y P.Gamarra: Un Scopaeus anoftalmo en Europa Occidental y reconsideración taxonómica de Domene bifossicapitata Outerelo y Oromí, 1987 (Coleoptera, Staphylinidae). Actas del International Congress of Coleopterology Barcelona, 18-23 Sept. 1989, (en prensa)

(15) J.J.Hernández y J.L.Martín: Tres nuevas especies de Apteranopsis (Coleoptera Aleocharidae) troglobias de la Isla de La Palma (Canarias). Ann. Soc. Ento. France, (en prensa)

(16) J.M.Fúster; E.Ancochea; E.Ibarrola; J.Coello; F.Hernán; J.M.Cantagrel; C.Jamond y A.Cendrero: Ensayo de cronoestratigrafía de la Isla de La Palma. Abstract of ESF Meeting on Canarian Volcanism, Lanzarote Nov.-Dec., 111-115 (1989)

(17) P.Gamarra y J.J.Hernández: Apteranopsis outereloi n. sp. y observaciones sobre los Staphylinoidea (Col.) cavernícolas de Canarias. Mémoires de Biospéologie, Tome XVI, 53-62 (1989)

(18) F.Español: Los Domene cavernícolas de Marruecos. Comunicacions 6è Simposi d' Espeleologia, Terrassa, 73-80 (1977)

(19) H.Coiffait: Colèoptères Staphylinidae de la Région paléarctique occidentale. IV. Sous famille Paederinae Tribu Paederini. 1 (Paederini, Lathrobii). Suppl Nouv. Rev. Ent., 12 (4), 1-434 (1982)

(20) R.Outerelo: Domene (Lathromene) hispanicum n. sp. de España y una homonimia-sinonimia del subgénero Spelaeomene Español. Anales Biol. Univ. Murcia, 3 (Biol. Animal), 103-106 (1985)

Rev.Acad.Canar.Cienc., II, 93 - 97 (1990)

# THAUMETOPOEA HERCULEANA RAMBUR, 1840 (LEPIDOPTERA: THAUMETOPOEIDAE) NUEVA ESPECIE PARA LA FAUNA DE CANARIAS

J. J. Bacallado y J. J. Hernández

Museo de Ciencias Naturales de Tenerife. Apdo. 853
38080 Santa Cruz de Tenerife (Islas Canarias)

ABSTRACT

The species Thaumetopoea herculeana Rambur, 1840 is reported from the island of Fuerteventura. This represent the first record of the family Tahumetopoeidae for the canarian moths (Lep. Hetherocera) fauna. A brief discussion on its different subespecies and distribution is made.

KEY WORDS: Thaumetopoea herculeana, new record, Fuerteventura, Canary Islands.

## INTRODUCCION

Desde la publicación del último catálogo actualizado de los macrolepidópteros nocturnos de Canarias por Bacallado y Pinker (1982)(1), muy pocos trabajos han venido a sumarse a las investigaciones que sobre los lepidópteros hereróceros se llevan a cabo en el Archipiélago, exceptuando los muy notables de Klimesch dedicados a los microlepidópteros. SCHMITZ (1988)(2) señala la presencia en Canarias de Polytela cliens (Noctuidae; Hadeninae), elemento tropical de zonas áridas cuyas larvas se nutren de especies del género Pancratium; el hallazgo de P. cliens se realizó en Fuerteventura. Son precisamente las islas e islotes orientales (Fuerteventura, Lanzarote, Graciosa y Alegranza) los únicos enclaves canarios donde aún es posible detectar aspectos novedosos en lo que a la fauna de macroheteróceros se refiere. A estas islas hemos dedicado nuestras más recientes colectas e investigaciones, dando como resultado el hallazgo -en Fuerteventura- de Thaumetopoea herculeana, lo que representa la primera cita de una especie de la familia Thaumetopoeidae en el Archipiélago Canario.

## Familia **Thaumetopoeidae** (Aurivillus, 1891)

Siguiendo a GOMEZ-BUSTILLO (1979)(3); "Ha sido largo el camino recorrido por esta agrupación taxonómica para alcanzar el status familiar". "La mayoría de los lepidopterólogos modernos le reconocen este nivel taxonómico, admitiendo su afinidad natural con otras

familias, en especial con los Notodontidae y los Lymantriidae, teniendo en cuenta como carácter principal sus órganos timpánicos torácicos de tipo notodontoide".

Para GOMEZ-BUSTILLO (4), los Taumetopoeidos representan la línea plesiomorfa entre los descendientes de los proto-notodontoides, afirmación que parece fácil sostener al comparar los andropigios de este grupo con los de la familia Notodontidae. En palabras de este autor: "las estructuras genitálicas de los Taumetopoeidos son netamente menos especializadas (por tanto, plesiomorfas) que las que se encuentran en los Notodóntidos".

KIRIAKOFF (fide GOMEZ-BUSTILLO) acepta como buena la familia Thaumetopoeidae, dentro de la cual es dable reconocer tres grupos separados con el rango de subfamilias: Thaumetopoeinae (Aurivillus, 1891), paleártica y en parte oriental; Anaphinae (Kiriakoff, 1970), etiópica-malgache, y Epicominae (Kiriakoff, 1970), australiana.

Sólo la primera de estas subfamilias tiene representantes en la Península Ibérica, tratándose únicamente de especies del género Thaumetopea (Hubner, 1819) ligadas en gran parte a pinares y encinares, salvo T. herculeana -que ahora parece colonizar también Canarias- que se alimenta de plantas bajas silvestres sin interés económico.

**Thaumetopoea herculeana Rambur, 1840** (Fig. 1)

Fué descrita de España por Rambur (Faune entomologique de l´Andalousie, 1837-1842) y su distribución mundial parece limitada a España y Marruecos (5), colonizando toda la región litoral mediterránea, desde Tanger hasta el Líbano (6).

Para RUNGS (5) la especie es común en el Marruecos atlántico, donde vuela desde septiembre a noviembre, con una frecuencia máxima en octubre. Asimismo dicho autor considera que las poblaciones marroquies pertenecen a la subespecie colossa Bang-Hass, 1910. Según recoge RUNGS en su catálogo ordenador de los lepidópteros de Marruecos, la ssp. colossa se presenta bajo varias formas localizadas:

- colossa colossa Bang-Hass, que se encuentra en el Rif.
- colossa extrema Seitz, que habita en las llanuras y las bases montañosas atlánticas al norte del Alto-Atlas.
- colossa abdallah Rungs, coloniza el Medio-Atlas.
- colossa cf. zernyi Agenjo, del valle del Souss.

Los dos ejemplares capturados por nosotros lo fueron durante

FIG. 1. *Thaumetopoea herculeana* (♂). La Oliva, Fuerteventura.

los meses de noviembre y diciembre en la localidad de La Oliva (Fuerteventura), lo que amplía su rango de vuelo. Se utilizó para ello la clásica trampa luminosa con una lámpara esmerilada blanca de 160 W.

Ambos ejemplares (♂♂ ) estaban en inmejorables condiciones, lo que indica su no muy lejana eclosión y refuerza nuestro convencimiento de que un estudio detallado de su biología y bionomía podría depararnos aspectos novedosos en lo que a su época de vuelo y número de generaciones anuales se refiere.

No parece dudoso que se trata de la ssp. colossa, aunque PINKER(†) (in litt) me ha comunicado su semejanza con las poblaciones que viven en el sur de España, más concretamente en Cádiz.

Destaca sobremanera la densa pilosidad del tórax, de tonalidad marrón con algunos mechones blanquecinos, así como las alas anteriores y posteriores con los dibujos, bandas y máculas bien diferenciada y delimitadas, tal y como muestra la fotografía. El detalle de las alas posteriores cobra especial importancia, recordando la forma zernyi descrita por AGENJO (7) del valle del Souss. La envergadura alar alcanza los 30 mm. GOMEZ-BUSTILLO (3) considera esta especie como la más hermosa y estilizada de cuantas

viven en la Península Ibérica. Para una correcta y sencilla separación entre las especies del género Thaumetopoea, basta con preparar la fultura del andropigio (6), al menos con aquellas presentes en el área mediterránea-norteafricana.

Las larvas, negruzcas y provistas de grandes pelos azules dispuestos en mechones, son gregarias. Se alimentan de especies de los géneros Erodium, Helianthemum y Cistus.

En Fuerteventura viven varias especies del género Erodium que podrían servirle de planta nutricia, tales como: E. cicutarium (macaronésica y norteafricana), E. laciniatum (mediterráneo-sahariana), E. chium (mediterránea) y otras.

En lo que a cistáceas se refiere, las larvas de T. herculeana disponen en la citada isla de cuatro o cinco especies pertenecientes al género Helianthemum: H. canariense (endémica), H. confertum (saharo-índica), H. thymiphyllum (endémica), etc.

Material estudiado: 2♂♂ La Oliva (Fuerteventura), 20-XI-1979 (Bacallado leg.) y 19-XII-1979 (Dominguez leg.), depositados en la colección Pinker (Viena) y en el Museo Insular de Ciencias Naturales de Tenerife.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración prestada por el Conservador de Botánica del Museo de Ciencias Naturales de Santa Cruz de Tenerife, Lázaro Sánchez-Pinto, así como la del biólogo Fernando Dominguez por facilitarnos parte del material. El trabajo de Kunkel (1977)(8) resultó muy eficaz para el conocimiento de las posibles plantas nutricias de las larvas.

BIBLIOGRAFIA

(1) J.J. Bacallado y R. Pinker: Adiciones y correcciones al catálogo de los macrolepidópteros (Ropalóceros y Heteróceros) del Archipiélago Canario. La Laguna, Instituto de Estudios Canarios. 50 Aniversario, I Ciencias, 1-19 (1982)

(2) W. Schmitz: Polytela cliens (Felder y Rogenhofer, 1874) (=Glottula orientalis Hampson, 1894) neu für die Kanaren (Lepidoptera: Noctuidae). Nota Lepid., 11 (1), 80-82 (1988)

(3) M. R. Gomez Bustillo: Mariposas de la Península Ibérica. Heteróceros II. Taumetopoeidos. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Agricultura. Madrid, 55-69 (1979)

(4) M. R. Gomez Bustillo y M. Arroyo Varela: Catálogo sistemático de los lepidópteros ibéricos. Monografías I.N.I.A. Ministerio

de Agricultura y Pesca, Madrid, 30, 268-272 (1981)

(5) C. Rungs: Catalogue raisonné des Lápidoptères du Maroc. Institut Scientifique de l´Université Mohammed V, Rabat, Tome II, 1459, 284 pp. (1981)

(6) M. R. Gomez Bustillo: Los Thaumetopoeidae (Aurivillus, 1891) de la Península Ibérica: Nociones de Sistemática, ecología e importancia económica de la familia. Shilap, Revta. Lep. Vol. V, 20, 283-290 (1977)

(7) R. Agenjo Cecilia: Monografía de la familia Thaumetopoeidae (Lep.). Eos, 18, 69-130 (1941)

(8) G. Kunkel: Las plantas vasculares de Fuerteventura (Islas Canarias), con especial interés de la forrajeras. Naturalia Hispanica, I.C.O.N.A., Madrid, 8, 131 pp. (1977)

Rev.Acad.Canar.Cienc., II, 99 - 120 (1990)

# EL GENERO GEITODORIS BERGH, 1891 (MOLLUSCA: NUDIBRANCHIA) EN LAS ISLAS CANARIAS*

Jesús Ortea

Depto. Biología Organismos y Sistemas. Lab. Zoología, Universidad de Oviedo

ABSTRACT

The study of the genus Geitodoris Bergh, 1894, in the Canary Islands has shown the presence of four species: G. planata (Alder & Hancock, 1846), from the Atlantic European coast, G. pusae (Marcus, 1955), from the Caribbean Sea and Brazil, together with two other new ones, G. perfossa and G. bacalladoi. All their anatomies are studied in detail.

KEY WORDS: Mollusca, Nudibranchia, Geitodoris, Taxonomy, Canary Islands

## INTRODUCCION

Desde que en 1980 y con la puesta en marcha del Plan de Bentos Circuncanario, iniciamos el estudio de los Opistobranquios de las Islas Canarias, hemos ido abordando distintos aspectos de las especies del subórden Doridacea: redescripción de las especies de Alcide d´Orbigny (1), descripción de especies enmascaradas (2), estudio de familias completas (3) y cita de animales que eran conocidos tan sólo en el Atlántico Oeste (4).

En este trabajo realizamos el estudio de las especies del género Geitodoris Bergh, 1891, recolectadas en las Islas entre 1980 y 1985, comparando los ejemplares de alguna de ellas con material procedente de otras regiones geográficas.

Familia **Discodorididae** Bergh, 1891
Género Geitodoris Bergh, 1891
Especie tipo Doris complanata Verrill, 1891

Carácter distintivo primario: Rádula con dos tipos de dientes, laterales ganchudos, con o sin dentículos y marginales espatuliformes.
Caracteres secundarios: Tentáculos orales digitiformes, armadura labial con engrosamientos estratificados que forman bastones poco desarrollados, vesículas seminales seriadas, pene inerme.

---

* Trabajo realizado dentro del programa FAUNA IBERICA I (PB870397) financiado por la CICIT

## G e i t o d o r i s  p l a n a t a (Alder y Hancock, 1846)

Sinónimos: Doris planata Alder & Hancock, 1846

Doris testudinaria Alder & Hancock, 1862

Referencias: Alder & Hancock, 1846; p. 292-293, pl. 8, fig. 1-7. Doris planata Eliot, 1910; p. 99, pl. 1, fig. 5-9. Doris testudinaria Pruvot-Fol, 1954; p. 267. Geitodoris planata Thompson & Brown, 1975; p. 132, fig. 69. Discodoris planata Hunnan & Brown, 1975; p. 141 fig. 6. Discodoris planata Urgorri, 1981; p.356-358 Discodoris planata Cervera, García y García, 1985; 198-204. Geitodoris planata

Material examinado: Quiberon (Bretaña) (47º30´N, 03º10´W), 15.3.72, 2 ejs. de 15 mm de ancho fijados y contraídos; 16.2.72, 2 ejs. de 20 mm de ancho; 8.10.75, 1 ej. de 7x4 mm fijado (Dr. P.Bouchet leg.).-Sardinero, Santander (Cantabria)(43º 30´N,03º50´W), 24.4.82, 2 ejs. de 45 y 30 mm de largo en vivo, junto con cintas ovígeras, en la zona de mareas.- Puerto de El Musel, Gijón (Asturias)(43º40´N,05º 50´W), 6.7.87, 1 ej. de 40 mm vivo a 6 m de profundidad.- Punta de Abades (Tenerife)(28º08´N,16º26´W), 19.2.78, 2 ejs. a 4 m; 12.3.78, 1 ej. a 4 m.- Los Cancajos (La Palma)(28º39´ N,17º45´ W), 15.8.81, 2 ejs. entre 2 y 4 m de profundidad. Todos los animales de Canarias (Pérez Sánchez leg.) fueron recolectados bajo piedras donde abundaba la esponja Hemimycale columella. El mayor midió 60 mm.

DESCRIPCIÓN EXTERNA

Dorso de color ocre o pardo naranja, más o menos oscuro, con alguna manchita castaño y conspicuas manchas blancas, estrelladas o no, que coinciden por lo general con la presencia de un gran tubérculo en su zona central. En la zona media del manto hay también estrechas bandas longitudinales y discontinuas de color blanco.

Todo el dorso está recubierto por tubérculos esféricos (FIG.1A) no pedunculados, de tamaño desigual y distribución apretada, entre los que destacan 7 a 9 tubérculos pigmentados de blanco y repartidos de forma espaciada (la mitad a cada lado), situados en el centro de conspicuas áreas estrelladas de color blanco. Cerca de estos tubérculos se pueden ver pequeñas aberturas glandulares de borde castaño. En general los tubérculos del dorso se hacen más pequeños hacia el borde del manto y este último es algo onduloso.

Branquia formada por 8 ramas tripinnadas, distribuidas en dos grupos de 4, las hojas son de color pardo grisáceo, manchadas de blanco grisáceo y blanco opaco, este último preferentemente en el raquis. En la zona media entre los dos grupos (FIG.1D) suele haber una ramificación branquial aislada que llega hasta una papila anal alta, arrugada, de color castaño oscuro con manchas blanco opaco y abertura estrellada.

Vaina rinofórica elevada, con el borde irregular (FIG.1B), ornamentada con tubérculos de distinto tamaño, similares a los del manto.

Rinóforos con el pedúnculo pigmentado por finos puntos pardo-naranja y con las laminillas, en número de 15 en animales de 30 mm, manchadas de pardo naranja y blanco.

Pie surcado y hendido anteriormente (FIG.1C), de color amarillo claro con alguna manchita pardo naranja; algo más largo que en el manto, sobresale ligeramente por la parte posterior del animal cuando se desplaza. Hiponoto amarillo claro con manchitas pardo naranja dispersas y con una red de espículas poco aparente. Cabeza con tubérculos cónicos, amarillos y macizos. Flancos muy transparentes, dejando ver a su través un hepatopáncreas casi negro. Cuerpo muy blando al tacto en los animales vivos.

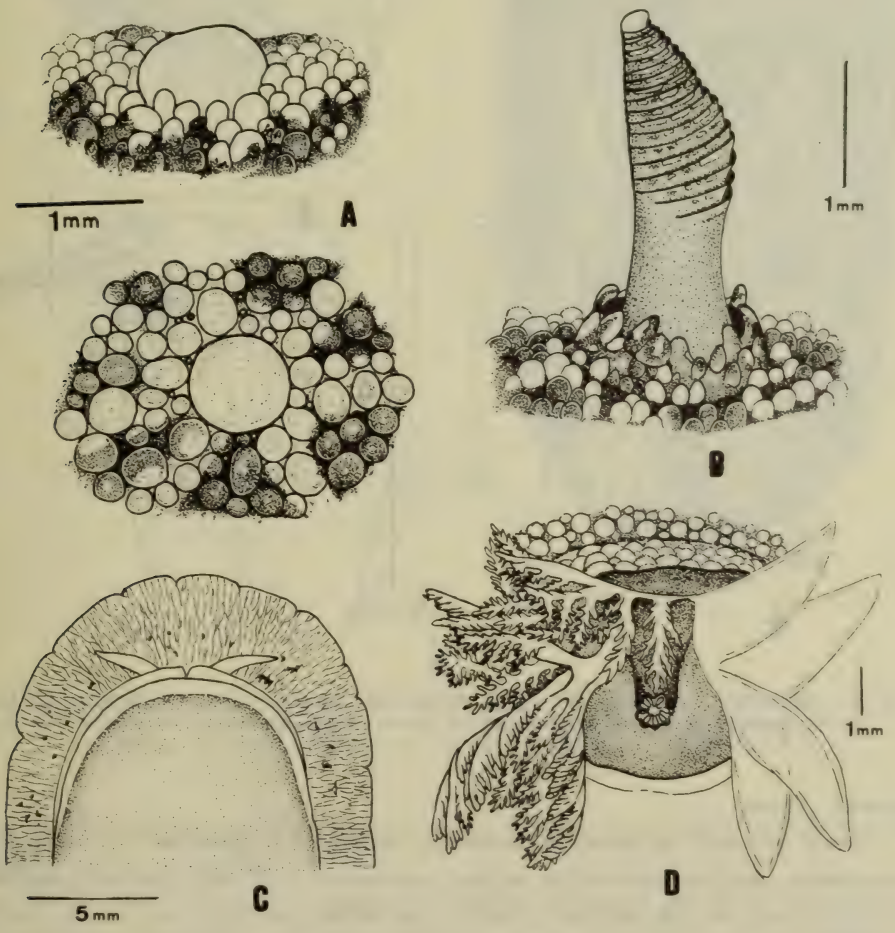



FIG. 1.- **Geitodoris planata.** A= tubérculos del dorso en vista lateral y superior, B= Rinóforo y vaina rinofórica, C= Vista ventral de la parte anterior, D= Esquema de la branquia.

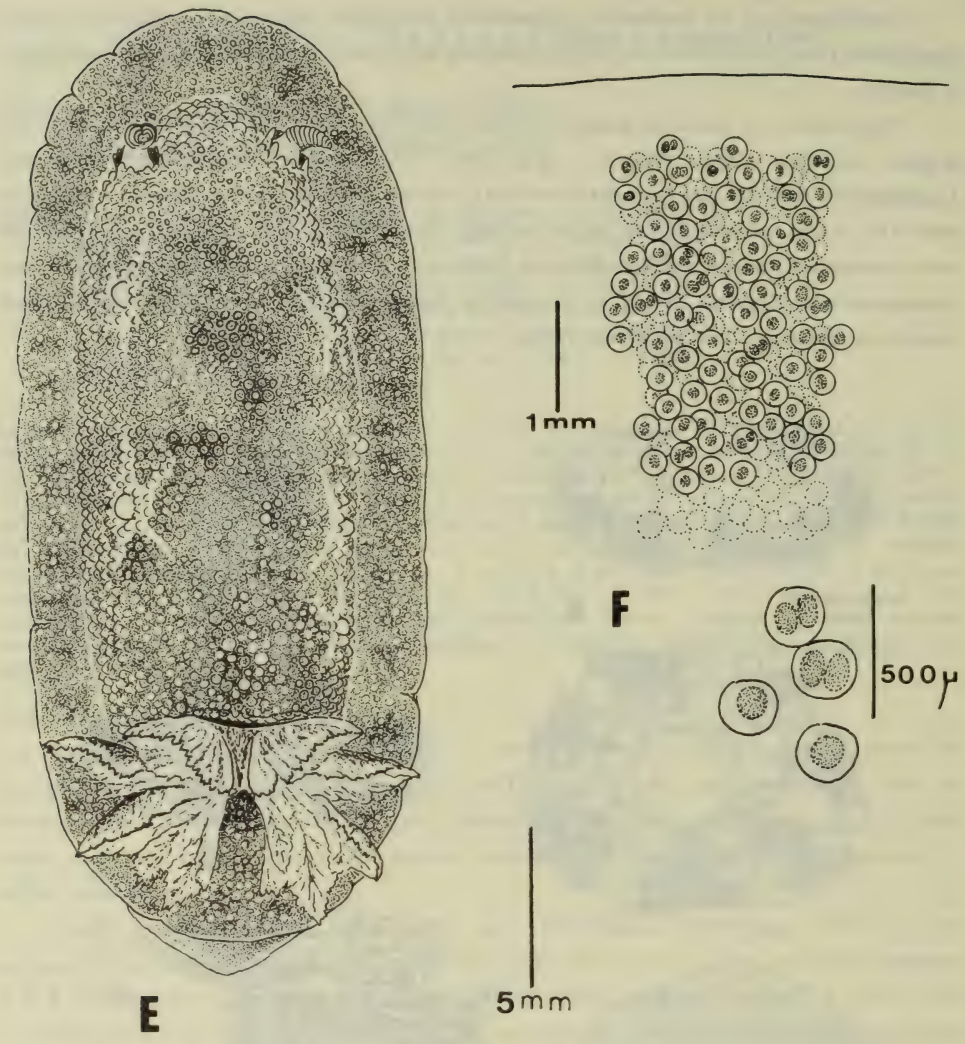



FIG. 2.- **Geitodoris planata.** E= vista dorsal del animal vivo, F= Detalle de la disposición de los huevos en la cinta ovígera.

ANATOMIA INTERNA

Hemos disecado animales de Quiberon, Santander y Canarias de dimensiones aproximadas, que corresponderían en vivo a ejemplares de unos 30 mm de longitud.

El techo de la cavidad visceral presenta puntitos de color castaño espaciados y una red de espículas distribuidas en polígonos, visibles por transparencia.

Armadura labial (FIG.3G) formada por dos piezas trapezoidales provistas de bastones rugosos e irregulares en su parte externa, largos cordones rugosos en la

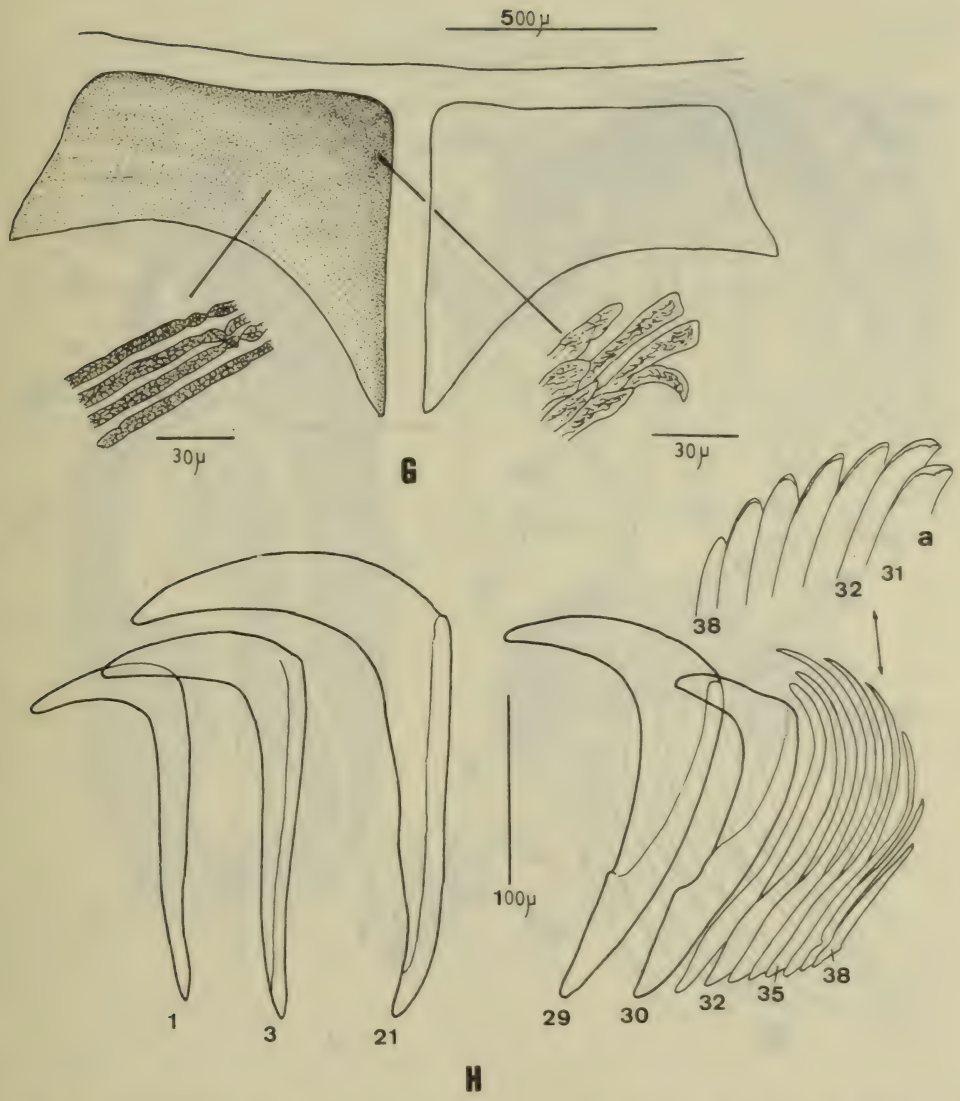



FIG. 3.- **Geitodoris planata.** Detalle de la armadura labial (G) y de una semihilera de la rádula (H) en un animal de Santander de 30 mm.

zona media y espesamientos poligonales en la interna. La anchura de los bastones aislados es de 5-7 micras.

Rádula (FIGS.3H y 4J) formada por dientes laterales ganchudos y marginales en espátula. Su fórmula se puede escribir 23 x 8-35-0-35-8 en el animal de Quiberon, 21 x 8-30-0-30-8 en el de Santander y 22 x 6-27-0-27-6, en el de Canarias. En la segunda rádula estudiada, de dimensiones intermedias, los dientes crecen de forma regular del 1 al 24, se estabilizan del 25 al 27 y decrecen del

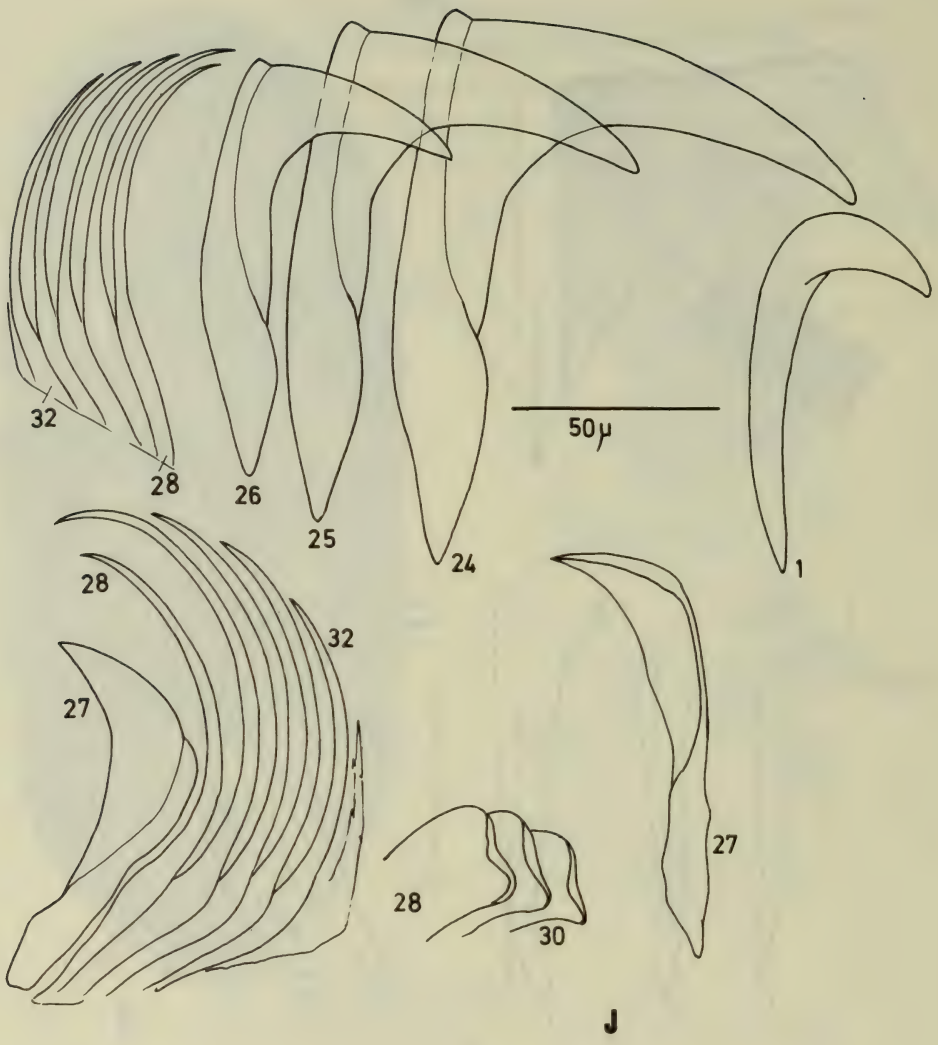



FIG. 4.- **Geitodoris planata.** J= Aspectos de una semihilera de la rádula de un animal de Canarias de 30 mm.

28 al 30. Los mayores dientes laterales midieron alrededor de 160 micras en el gancho. El tercer diente marginal es el más largo de su serie.

El resto del aparato digestivo (FIG.5K) se caracteriza por presentar un esófago corto y grueso que desemboca en un estómago piriforme.

La glándula sanguínea es doble y de color pardo violáceo. La arteria cefálica es muy amplia hasta que pasa bajo el intestino, luego se divide en dos ramas, una hacia la porción anterior de la glándula sanguínea y otra hacia la

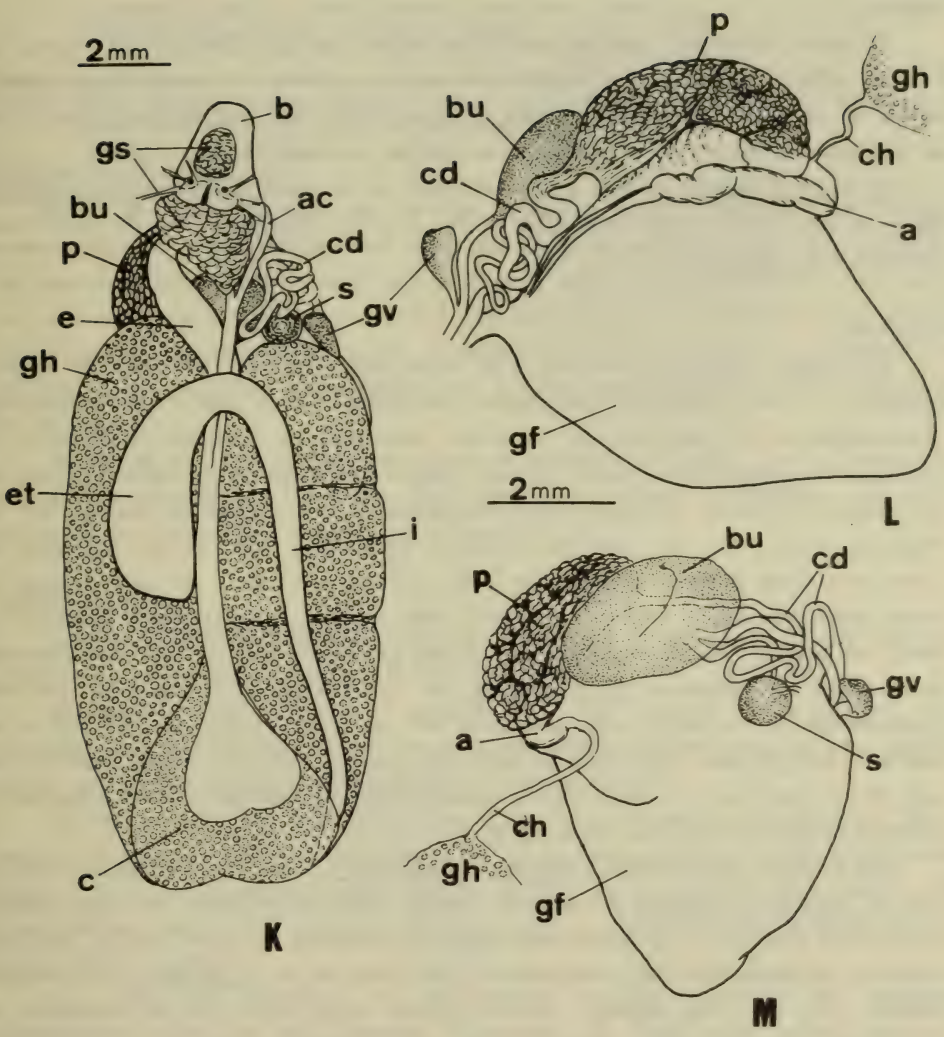



FIG. 5.- **Geitodoris planata.** K= Aspecto de las vísceras en posición, L y M= Aparato genital en posición ventral (L) y dorsal (M).

anterior.

El aparato genital (FIG.5L y 5M) presenta una próstata blanca, de aspecto cerebriforme de la que surge un conducto deferente largo y apelotonado. Las vesículas seminales son globosas y de tipo seriado, con la glándula gametolítica tres veces mayor que el espermatocito. Hay una glándula vestibular aplastada y el pene es inerme.

BIOLOGIA

La puesta (FIG.2F), recolectada en Santander, es una cinta blanco rosada de 1 cm de alto. Los huevos se distribuyen en su interior aislados o por pares, dentro de cápsulas "encadenadas", más o menos esféricas. Los huevos midieron 98 µm (extremos de 90 y 112) y las cápsulas 220 µm (extremos de 208 y 229).

Geitodoris planata parece que se alimenta de la esponja Hemimycale columella sobre la que es frecuente recolectarlo (5, 6 y 7). Urgorri (1981)(8) cita como alimento a H. sanguinea.

DISCUSION

Geitodoris planata, especie cuya localidad tipo es la isla de Arran, Escocia, ha sido redescrita en fechas recientes (9) a partir de ejemplares recolectados en el Estrecho de Gibraltar revisando su posición sistemática y distribución geográfica. A pesar de los riesgos que conlleva la redescripción de una especie a partir de ejemplares recolectados a miles de kilómetros de su localidad tipo y en una zona de tránsito faunístico como es el Estrecho de Gibraltar, donde podrían existir las especies que estudiamos en este trabajo y otras mediterráneas de aspecto similar, como Anisodoris stellifera (Vayssiere, 1904), es posible que los animales estudiados por Cervera et al. (9) correspondan en realidad al verdadero Doris planata de las costas de Escocia ya que son coincidentes en su estructura anatómica con nuestros ejemplares del Norte de España y Bretaña que, siguiendo su criterio, atribuimos a la misma especie, la cual vería aumentada su distribución hacia el Sur de manera notable gracias al material recolectado en las Islas Canarias.

Una especie mediterránea, Anisodoris stellifera tiene una coloración similar a la de Geitodoris planata y presenta también áreas estrelladas de color blanco en el dorso asociadas a gruesos tubérculos; la anatomía de esta especie, aún mal conocida, ha hecho que fuera considerada como sinónima de G. planata por diversos autores (10, 11). Sin embargo, nuestra propia experiencia nos ha mostrado la existencia de animales mediterráneos sin dientes radulares marginales espatuliformes ni armadura labial, propios de A. stellifera y nunca del tipo de G. planata, razón por la que estimamos que las citas mediterráneas de esta especie (12, 13, entre otras) deben de ser revisadas.

**G e i t o d o r i s  p u s a e (Marcus, 1955)**

Sinonimos: Discodoris pusae Marcus, 1955

Referencias: Marcus, 1955; p. 147-150, fig. 151-165, Discodoris pusae Marcus y Marcus, 1967; p. 82-85, fig.105-107, Discodoris pusae Thompson, 1980; p. 88-89, fig. 10,

Discodoris pusae Ortea, Luque y Templado, 1988: p. 243-246, figs. 3-10, Geitodoris pusae

Material examinado: Los Abrigos (Tenerife)(28º08´N,16º26´W), 20.10.79, 1 ej. de 17 mm (Pérez Sánchez leg.); Melenara (Gran Canaria)(28º59´N,15º22´W), 10.6.82, 1 ej. de 30 mm vivo y puesta. Los dos animales a 6 m de profundidad.

DESCRIPCION EXTERNA

Dorso de color leonado con manchas pardas o pardo ocráceas. Hay también áreas blancas y manchitas castaño asociadas, por lo general, con los tubérculos más grandes. Todo el manto está cubierto por tubérculos semiesféricos de tamaño variable y disposición apretada, entre los que se aprecian las aberturas de las glándulas del manto con el borde pigmentado de pardo. Una vez fijados los animales toman un color crema-rosado con algunos puntos pardo-rojizos dispersos por el manto.

Rinóforos con laminillas manchadas de castaño, al igual que la branquia; esta última formada por 7-8 hojas tripinnadas. Pie surcado y hendido, más corto que el manto. Cabeza con palpos digitiformes.

ANATOMIA INTERNA

Bajo la superficie del manto hay una estructura en forma de celosía con una glándula en el centro de cada celdilla (FIG.7G).

Armadura labial (FIG.6C) formada por dos piezas triangulares con engrosamientos poligonales estratificados, más desarrollados hacia la zona media, de los que surgen pequeños bastones en su extremo distal.

La rádula (FIG.7D) del animal de 30 mm vivo presentó como fórmula 29 x 15-25-0-25-15. Los dientes crecen del 1 al 15 de forma progresiva, se estabilizan entre el 15 y el 21 para decrecer del 21 al 25. Los dientes 25 y 26 pueden ser considerados como de tránsito. En los marginales es el tercero de la serie el que alcanza mayor talla.

El resto del digestivo se caracteriza por no presentar un estómago diferenciado fuera de la glándula digestiva, de cuya zona media sale el intestino. Por delante y detrás de los ganglios cerebroides hay una glándula sanguínea de color castaño rojizo.

La principal característica del aparato genital (FIG.7F) es la existencia de una glándula vestibular en forma de salchicha, provista de largos estiletes en su tracto final (FIG.7E). La próstata abraza por completo a la glándula gametolítica.

BIOLOGIA

La puesta es una cinta ondulosa de 1 cm de altura, en cuyo interior los huevos se enrollan en espiral (FIG.6B), apreciándose hasta cuatro capas. El diámetro de los huevos es de 95 micras de media (extremos de 83 y 103) y están aloja-

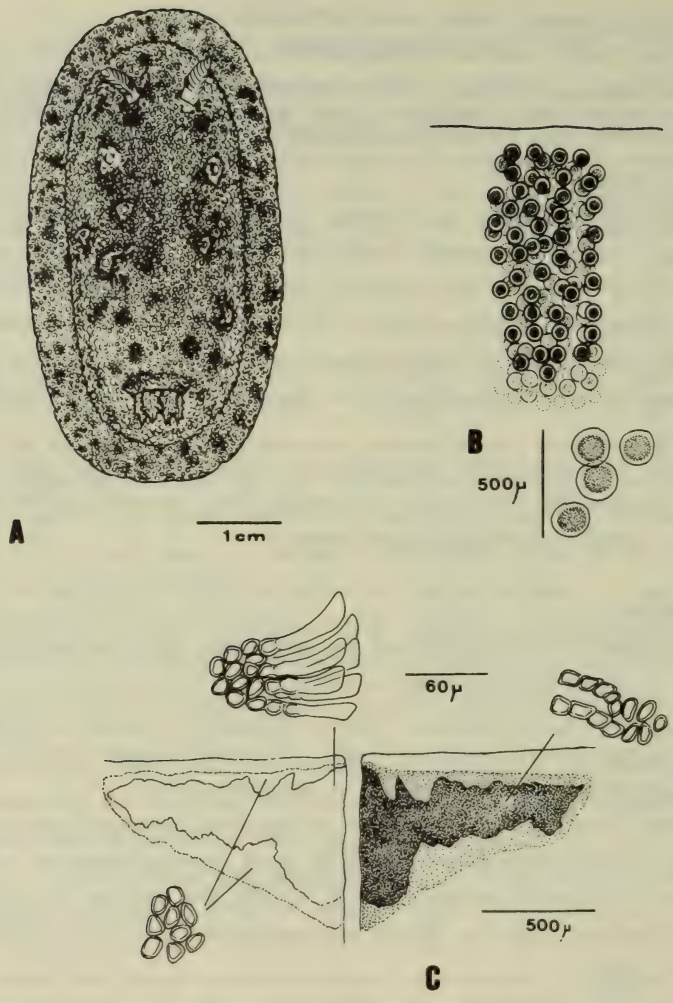



FIG. 6.- **Geitodoris pusae.** A= Vista dorsal del animal vivo, B= Detalle de la cinta ovígera, C= Armadura labial.

dos en cápsulas de 147 micras de media (extremos de 133 y 159 micras).

DISCUSION

En un trabajo anterior (4) discutimos ampliamente esta especie caracterizada por dos estructuras anatómicas singulares, la estructura glandular subepidérmica y la glándula vestibular con largos estiletes, a la vez que revisábamos su distribución geográfica.

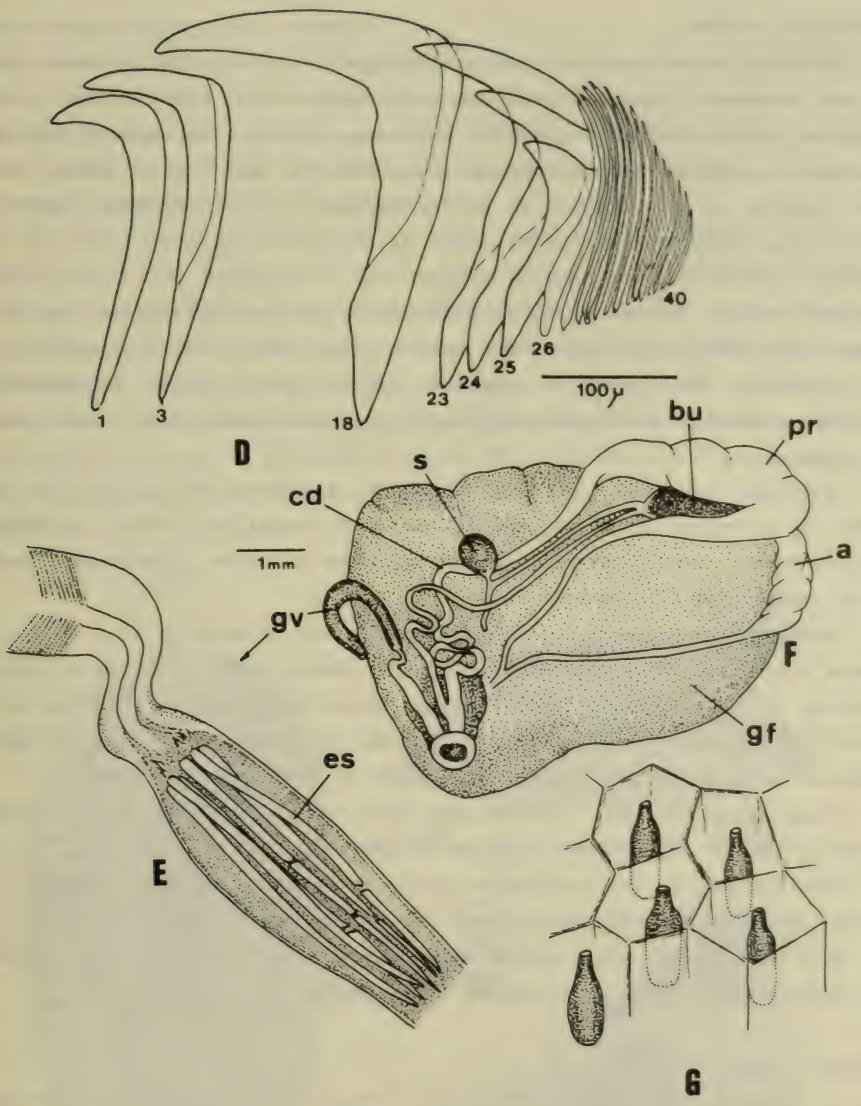



FIG. 7.- **Geitodoris pusae.** D= Semihilera de la rádula de un animal de 30 mm, E= Glándula vestibular y estiletes (es), F= Vista ventral del aparato genital, G= Detalle de la celosía del manto con las formaciones glandulares.

## Geitodoris perfossa n. sp.

**Material examinado**: Agua Dulce, Tenerife (28º09´N,16º25´W), 23.7.80, 1 ej. de 14 mm a 6 m de profundidad. Los Cancajos, La Palma (28º39´N,17º45´W, localidad tipo), 1 ej. de 11 mm a 2 m de profundidad entre algas calcáreas. Arrecife, Lanzarote (28º58´N, 13º31´W), 13.12.81, 6 ejs. de 20 a 35 mm, acompañados de puestas, en la zona de mareas.

DESCRIPCION EXTERNA

Color del dorso amarillo limón o anaranjado, con un fino punteado castaño que se concentra, en ocasiones, formando manchas de distribución y tamaño irregular, más abundantes en el medio del dorso. En los ejemplares menores de 30 mm existe una red de cordones blanquecinos (FIG. 8C) por todo el dorso, red que queda reducida a los alrededores de la branquia en los animales mayores. En general, los cordones blancos del dorso se difuminan hacia el borde del manto donde son sustituidos por manchas blanquecinas irregulares, más notorias en los animales mayores. En el centro de las manchas oscuras del dorso hay, por lo general, una abertura glandular (FIG. 8C,a), origen de su nombre específico.

Superficie del manto de aspecto rugoso, con verrugas abombadas poco salientes y algunos tubérculos redondeados muy espaciados y de tamaño desigual (FIG. 10G).

Rinóforos amarillos, con las laminillas punteadas de pardo y el ápice blanco. En un animal de 35 mm contabilizamos 17 laminillas. Vaina rinofórica en forma de cresta con 12 indentaciones en animales de 30 mm, ligeramente ondulada en los animales de 11 y 14 mm.

Branquia formada por 6 hojas bipinnadas en los animales de 11 a 20 mm y por 8 hojas tripinnadas en el resto. Presentan el raquis ancho, en forma de triángulo isósceles y son de color amarillo con manchitas pardas y blancas en las laminillas; el raquis es blanquecino. Cuando el animal se desplaza dirige las branquias hacia atrás. Papila anal pigmentada de castaño en el extremo.

Pie de color amarillo uniforme, más corto que el manto y mucho más estrecho; surcado y hendido ligeramente en su parte anterior.

Cabeza amarilla, con tentáculos digitiformes de igual color aguzados en el extremo; estos tentáculos abatidos son tan anchos como el pie.

Cara ventral del manto también amarilla, en ella se aprecia con dificultad una red subepidérmica de espículas de tres o cuatro ejes (FIG. 10F).

ANATOMIA INTERNA

La armadura labial (FIG. 9D) está formada por dos piezas trapezoidales dotadas de elementos poligonales irregulares alineados en cordones.

La rádula (FIG. 9E) tiene una fórmula en un animal de 14 mm 20 x 5-12-0-12 -5; los dientes laterales, ganchudos, tienen una altura muy similar a lo largo de toda la semihilera, mientras que los marginales, con forma de espátulas agudizadas en el ápice, decrecen de forma progresiva hacia el borde a partir del diente 16; los dientes 12-13 pueden ser considerados como de tránsito. Los mayores dientes midieron alrededor de 125 micras. En un animal de 30 mm la fórmula fue 23 x 9-35-0-35-9.

Hay un estómago piriforme, exterior a la glándula digestiva (FIG. 10J) y una

glándula sanguínea de color castaño.

El aparato genital (FIG. 11,L y M) presenta una próstata recubriendo a la glándula gametolítica y un receptáculo seminal alargado y doblado en los ejemplares jóvenes, que tiende a una forma esférica en los de mayor talla. El conducto deferente es largo y apelotonado. La glándula hermafrodita se extiende bajo el hepatopáncreas, por su lado izquierdo.

BIOLOGIA

La puesta, observada en diciembre en la zona de mareas, es una cinta de color naranja con los huevos en cordones apretados (FIG. 10H). Los huevos midieron 114 x 82 micras de media (extremos de 112 x 81 y 131 x 83) distribuyéndose en grupos de dos o tres en cápsulas de 198 x 140 micras para las de dos huevos (extremos de 194 x 144 y 200 x 146) o de 251 x 150 micras para las de tres huevos (extremos de 235 x 152 y 272 x 161).

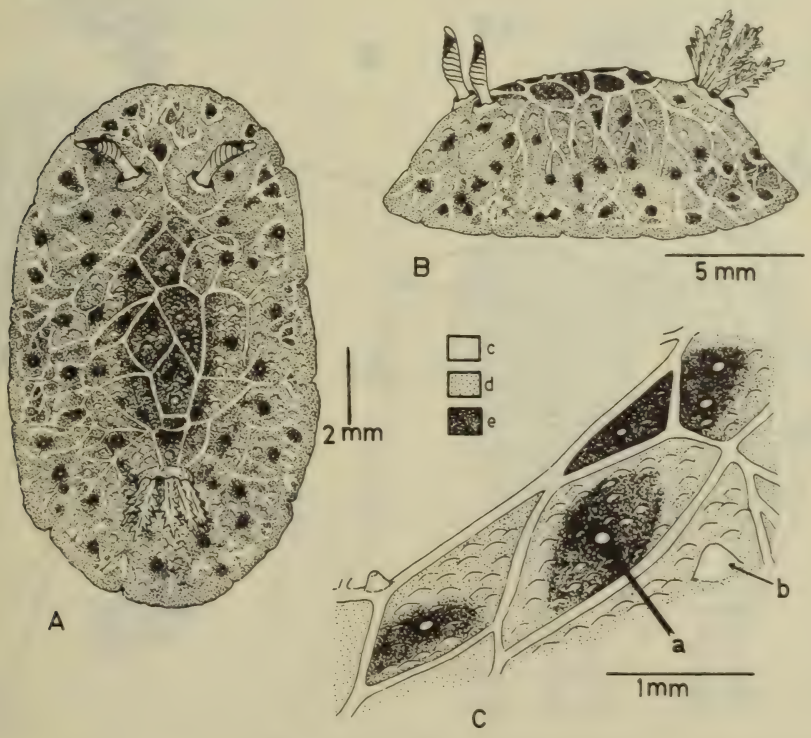



FIG. 8.- **Geitodoris perfossa n. sp.** A y B= Vistas dorsal y lateral del animal vivo de 14 mm, C= Detalle de la ornamentación del manto; a= abertura glandular, b= tubérculo blanco. Clave de colores; c= blanco, d= amarillo, e= castaño.

**ORIGEN DEL NOMBRE:** A la especie la denominamos G. perfossa del latín PERFODIO=AGUJEREAR, por las perforaciones que presenta en el manto.

**DEPOSITO:** Holotipo en las colecciones del MNHN de París, paratipos en el Museo Insular de Ciencias Naturales de Tenerife.

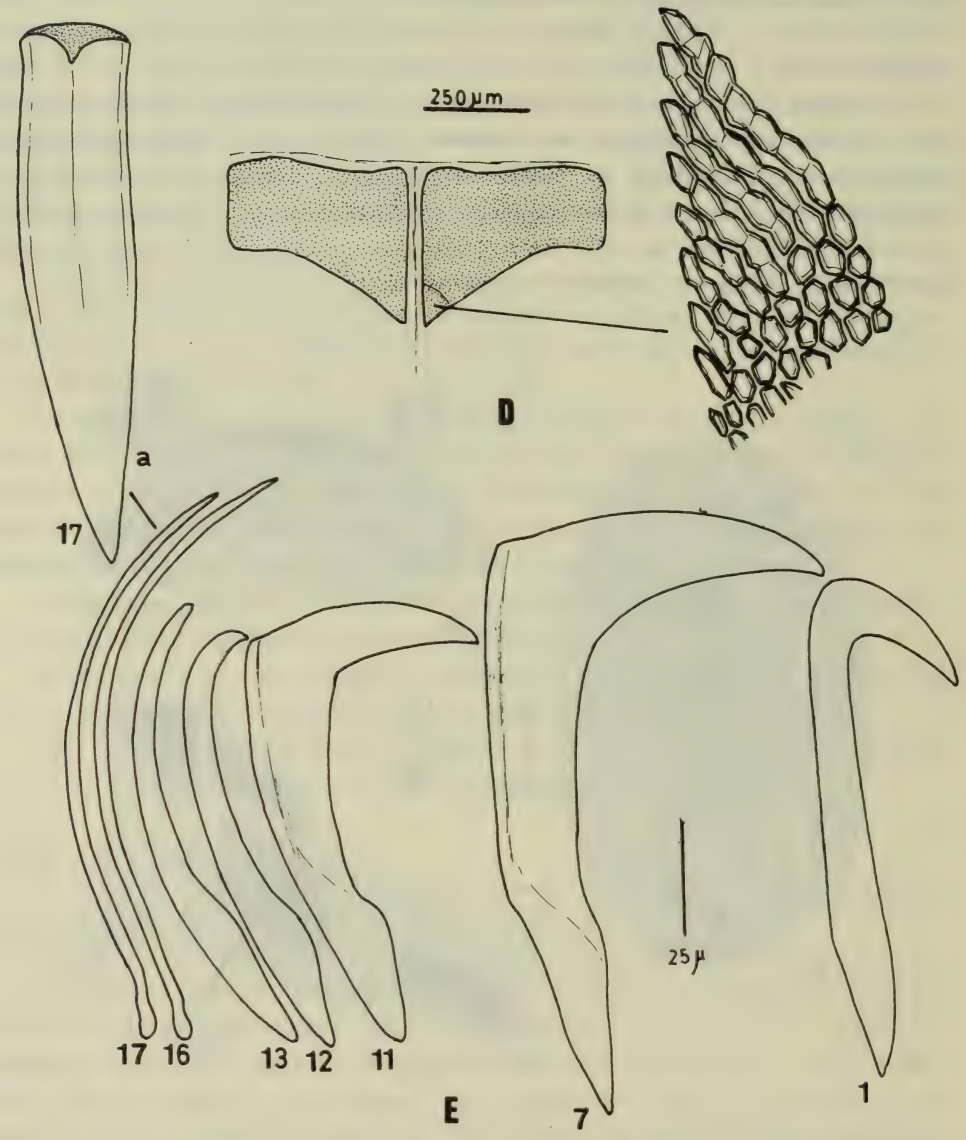



FIG. 9.- **Geitodoris perfossa n. sp.** D= Armadura labial, E= Semihilera de la rádula del animal de 14 mm.

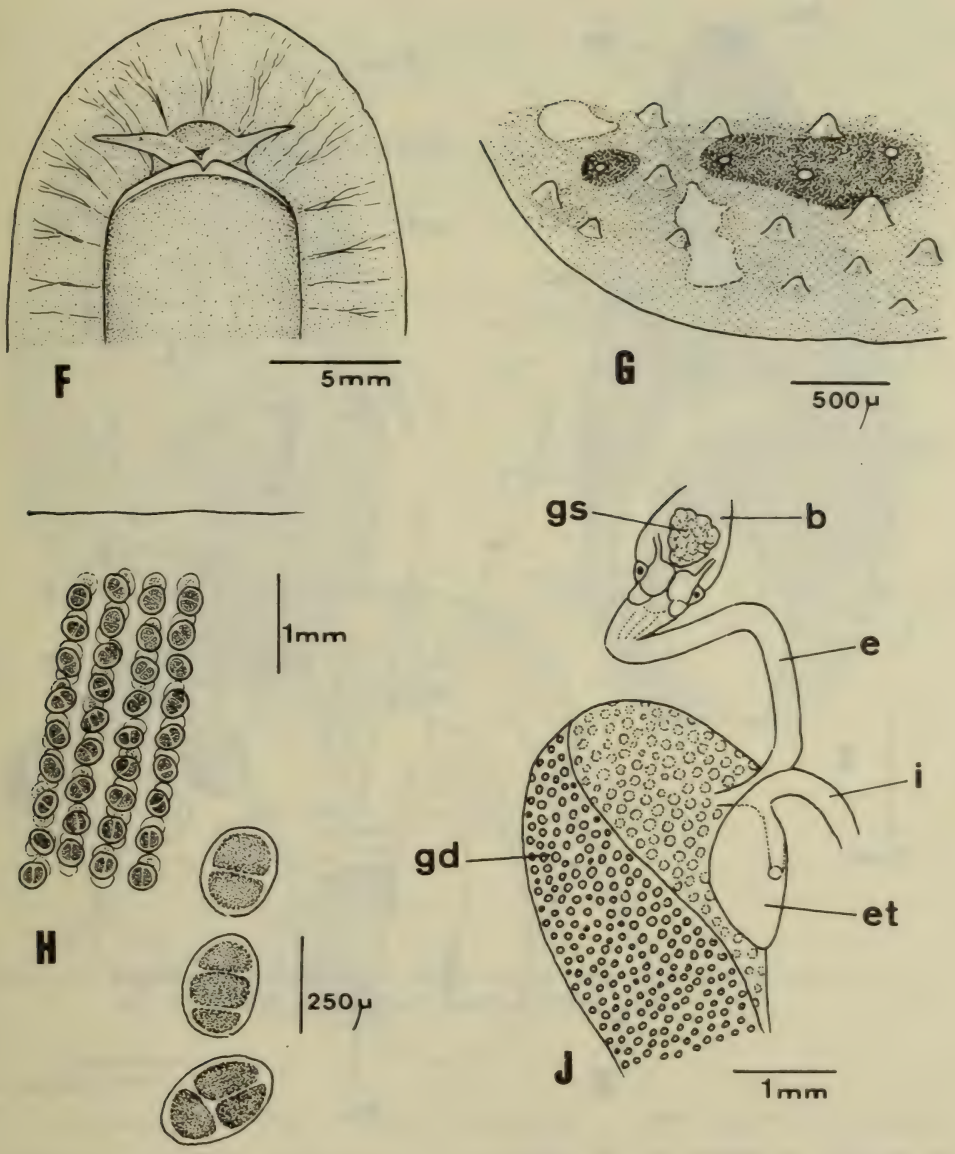



FIG. 10.- **Geitodoris perfossa n. sp.** F= Parte ventral anterior del animal, G= Detalle del manto en un animal de 30 mm, H= Disposición de los huevos en la cinta ovígera, J= Parte anterior del digestivo en un animal de 15 mm.

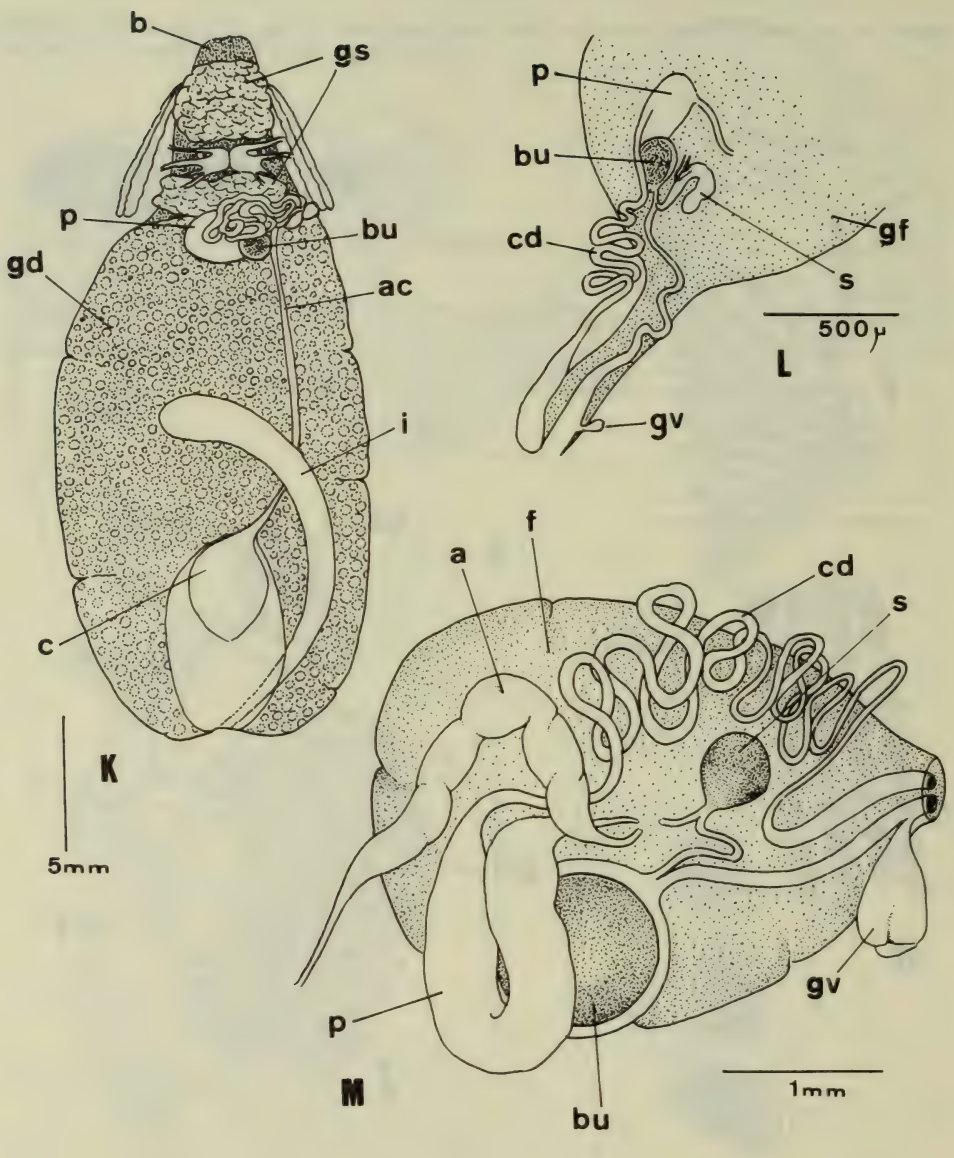



FIG. 11.- **Geitodoris perfossa n. sp.** K= Vísceras en posición, L y M= Aparato genital de animales de 15 mm (L) y 30 mm (M).

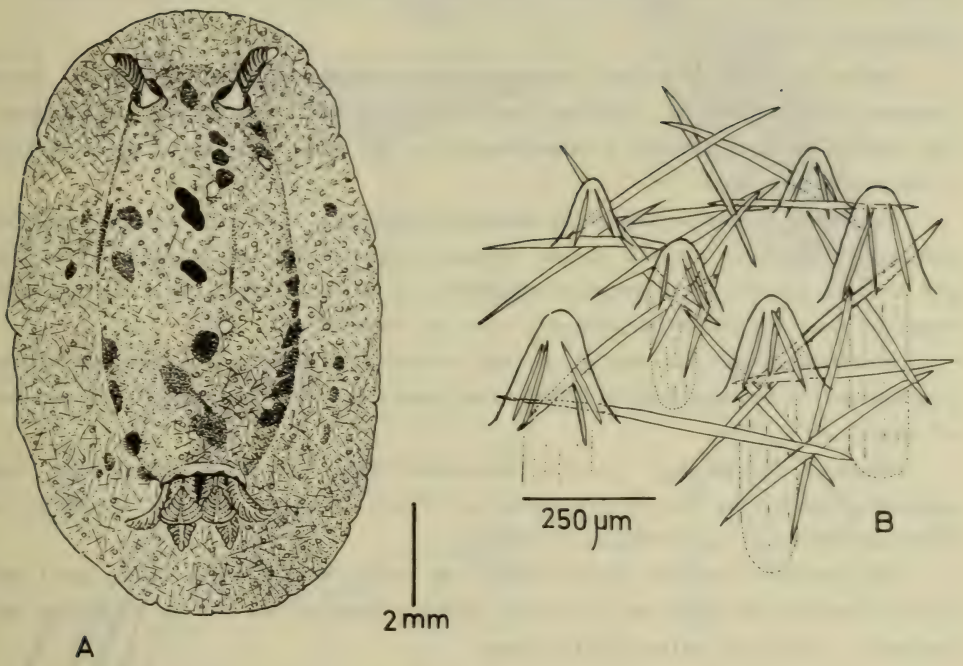



FIG. 12.- **Geitodoris bacalladoi n. sp.** A= Vista dorsal del animal vivo, B= detalle de los tubérculos y espículas del manto.

DISCUSION

El conjunto de los caracteres anatómicos y sobre todo la estructura superficial del manto diferencian a G. perfossa de las restantes especies del género. Una relación de las mismas en el Atlántico se puede ver en Ballesteros, Llera y Ortea (1984, p. 245) (2) y otra global en Ballesteros y Ortea (1981) (14) a la que habría que añadir G. capensis Bergh, 1907 de Sudáfrica y la especie que estudiamos en este trabajo, G. pusae.

## Geitodoris bacalladoi n. sp.

**Material examinado:** Los Cancajos, La Palma (28º39´N,17º45´W), 31.3.80, 1 ej. de 12 mm fijado recolectado a 4 m de profundidad.- Agua Dulce, Tenerife (28º02´N, 16º33´W, localidad tipo), 23.7.80, 1 ej. de 10 mm fijado a 6 m de profundidad.

DESCRIPCION EXTERNA

Dorso de color naranja, con manchitas castaño o granate, más o menos oscuras, en distribución irregular, que en la zona media pueden ser casi negras; hay también manchas blancas y un punteado fino por todo el dorso de color similar a las manchas oscuras.

Manto con numerosas espículas entremezcladas unas con otras formando una red apretada (FIG. 12B) visible en los animales fijados. En los animales vivos hay por toda la superficie tubérculos semiesféricos de tamaño desigual y distribución regular; unas 200-250 micras separan cada dos tubérculos.

Abertura rinofórica amplia y algo elevada. Rinóforos con las laminillas pigmentadas de castaño a excepción de las superiores, blanquecinas, lo mismo que el ápice.

Branquia formada por 8 hojas bipinnadas (FIG. 14F) de color naranja, con manchas granate y blanco, distribuidas en círculo alrededor del ano. Borde de la abertura branquial algo elevado y onduloso.

Pie surcado y hendido anteriormente, de color naranja uniforme al igual que la cara ventral del manto en la que se aprecia también una red de espículas muy aparente. Cabeza con palpos digitiformes.

ANATOMIA INTERNA

Hemos disecado el animal de 12 mm y extraido la rádula del de 10 mm. El estado de conservación del primero no permitió un estudio detallado de los aparatos digestivo y genital, cuyo esquema aproximado aparece representado en la figura 14: E y G.

Armadura labial formada por dos áreas triangulares (FIG. 13C) provistas de elementos poligonales aislados o unidos formando bastones.

La rádula (FIG. 13D) tiene por fórmula en el animal de 14 mm: 14 x 8-14-0-14 -8, siendo el diente 14 un diente de tránsito. Alguno de los dientes ganchudos más desarrollados presentan a veces pequeñas muescas a los lados de la cúspide. Los mayores dientes midieron alrededor de 160 micras.

Aparato genital (FIG. 14G) de tipo seriado, con la próstata colocada sobre la glándula gametolítica. Los conductos masculino y femenino están apelotonados y son difíciles de separar.

**ORIGEN DEL NOMBRE:** La especie la denominamos G. bacalladoi en honor del Dr. Juan José Bacallado y como homenaje a su ingreso en la Academia Canaria de Ciencias.

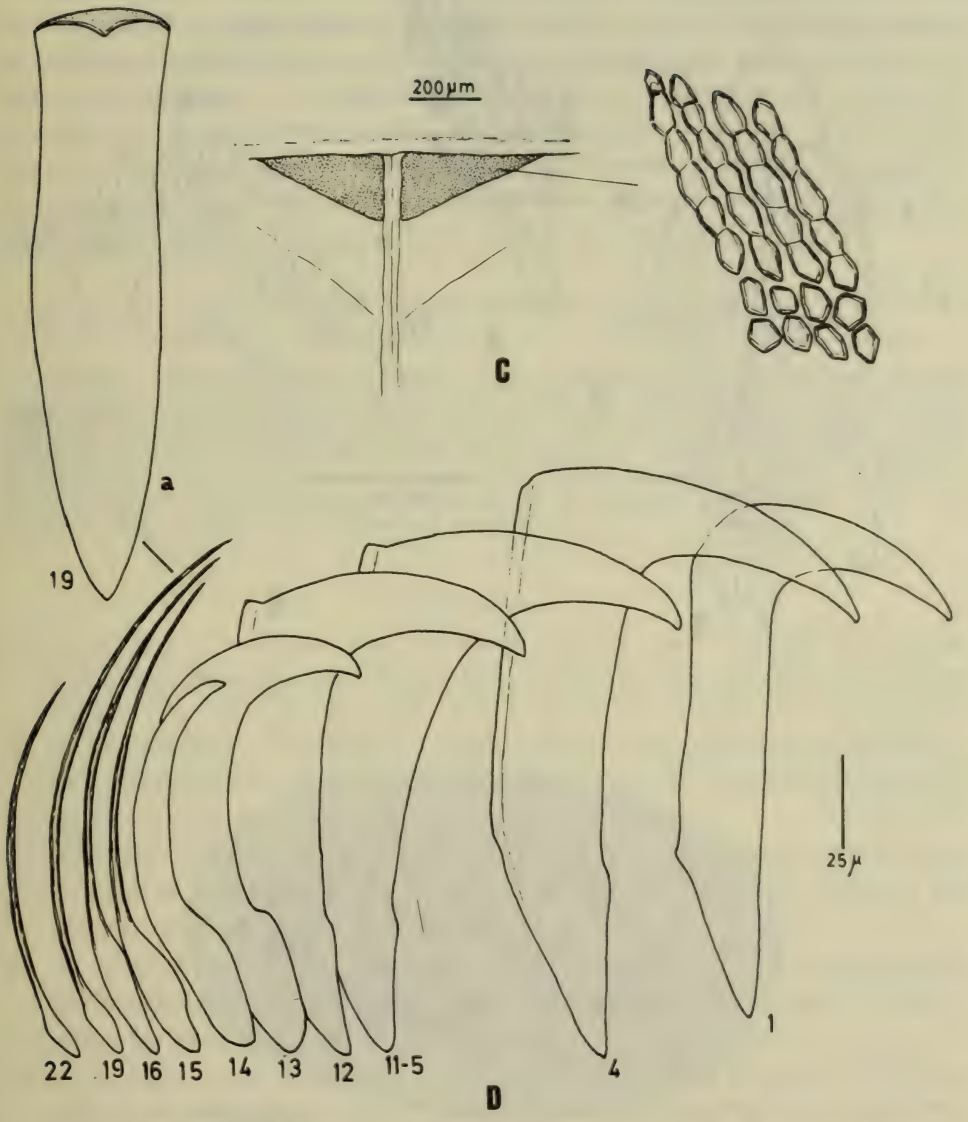



FIG. 13.- **Geitodoris bacalladoi n. sp.** C= Armadura labial, D= Semihilera de la rádula de un animal de 12 mm fijado.

**DEPOSITO:** Holotipo en las colecciones del MNHN de París, lo que resta del paratipo en el Museo Insular de Ciencias Naturales de Tenerife.

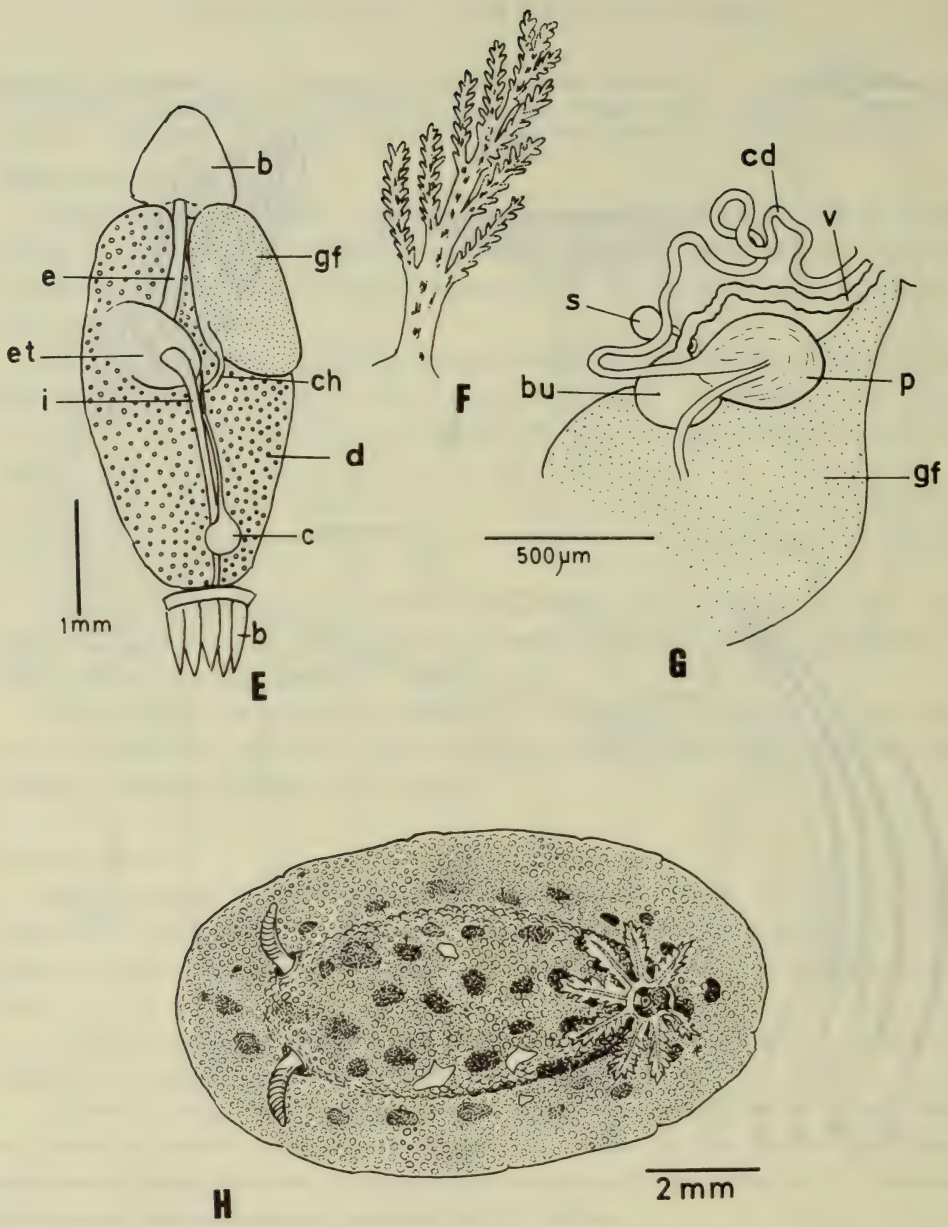



FIG. 14.- **Geitodoris bacalladoi n. sp.** E= Esquema de las vísceras en posición, F= Hoja branquial aislada, G= Esquema del aparato genital, H= Vista dorsal del mayor animal vivo (12 mm fijado).

**DISCUSION**

Dentro de las especies conocidas de Geitodoris, G. bacalladoi recuerda por su coloración a G. pusae Marcus, estudiado también en este trabajo; sin embargo la estructura subepidérmica de espículas de G. bacalladoi, muy distinta de la celosía de G. pusae y la ausencia de la glándula vestibular con estiletes, permiten una fácil diferenciación. Su comportamiento ante los fijadores es también un buen carácter para separarlos ya que, fijados en alcohol, G. pusae es extraordinariamente blando al tacto contrastando con una cierta rigidez en G. bacalladoi.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a todos los compañeros del Plan de Bentos Circuncanario, auspiciado por la Junta de Canarias, por toda la colaboración prestada durante las campañas de recolección y especialmente a Jose Miguel Pérez Sánchez por la cesión de parte del material aquí estudiado. Nuestro agradecimiento también al Dr. P. Bouchet del Museo Nacional de Historia Natural de París por proporcionarnos el material de G. planata de Quiberon y al Dr. Bacallado por la revisión crítica del manuscrito.

BIBLIOGRAFIA

(1) J. Ortea y J. Bacallado: Les Doridídae décrits des Canaries par Alcide d'Orbigny. Bull. Mus. nat. Hist. Nat., Paris, 4º ser.,3, sec. A,3, 767-776 (1981)

(2) M. Ballesteros, E. Llera y J. Ortea: Revisión de los Doridacea (Mollusca: Opistobranchia) del Atlántico Nordeste atribuibles al complejo maculosa-fragilis. Boll. Malacologico, 20 (9-12), 227-257 (1984)

(3) J. Ortea, J. Pérez y E. Llera: Moluscos Opistobranquios recolectados durante el Plan de Bentos Circuncanario. Doridacea. Primera parte (I). Cuadernos del Crinas, nº 3, 48 pp. Oviedo (1982)

(4) J. Ortea, A. Luque y J. Templado: Elysia picta Verrill, 1901 and Geitodoris pusae (Marcus, 1955) two amphiatlantic opisthobranchs gastropods. J. Moll. Stud. 54, 243-247 (1988)

(5) J. E. Forrest: On the feeding habits and the morphology and mode of function ing of the alimentary canal in some littoral dorid nudibranchiate Mollusca. Proc. Linn. Soc. London, 164, 225-235 (1953)

(6) T. E. Thompson: Grazing and the life cycles of British nudibranchs (in) Graz ing in terrestrial and marine environments. British Ecol. Soc. Symp.,4, 257-297 (1964)

(7) T. E. Thompson and G. Brown: British Opisthobranch Molluscs. Synopsis of the British Fauna, New Series, 8, Academic Press, London (1976)

(8) V. Urgorri: Opistobranquios de Galicia. Ph.D. Thesis. Universidad de Santia-

go de Compostela.

(9) J. L. Cervera, J. C. García y F. J. García: Redescription of Geitodoris planata (Alder and Hancock, 1846) (Gastropoda: Nudibranchia). J. moll. Stud.,51 198-204 (1985)

(10) T.E. Thompson and G. H. Brown: British Opisthobranchs Molluscs. Synopsis of British Fauna. New Series, 8, Academic Press, London, 201 pp. (1976)

(11) L. Schmekel and A. Portmann: Opisthobranchia des Mittelmeeres. Springer Verlag. Berlín (1982)

(12) J. Ros: Opistobranquios (Gastropoda:Euthyneura) del litoral ibérico. Invest. Pesq., 39 (2), 269-372 (1975)

(13) M. Ballesteros: Contribución al conocimiento de los Sacoglossos y Nudibranquios (Mollusca: Opisthobranchia). Estudio anatómico, sistemático y faunístico de las especies del Mediterráneo español. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona (inédita) (1980)

(14) M Ballesteros y J. Ortea: Nota sobre dos opistobranquios del litoral catalán P. Dept. Zool., 6, Barcelona 33-38 (1981)

**CLAVE DE ABREVIATURAS**

a = ampolla hermafrodita
ac= arteria cefálica
b = bulbo bucal
bu= glándula gametolítica (bolsa copulatriz)
c = corazón
cd= conducto deferente
ch= conducto hermafrodita
e = esófago
es= estiletes
et= estómago
gd= glándula digestiva (hepatopáncreas)
gf= glándula femenina
gh= glándula hermafrodita
gs= glándula sanguínea
gv= glándula vestibular
i = intestino
p = prostata
s = espermatocisto (receptáculo seminal)
v = vagina

Rev.Acad.Canar.Cienc., II, 121 - 142 (1990)

# CONTRIBUCION AL ESTUDIO FITOSOCIOLOGICO DE LOS RESTOS DE SABINARES Y OTRAS COMUNIDADES TERMOFILAS DE LA ISLA DE TENERIFE (CANARIAS)

O. Rodríguez, W. Wildpret, M.J. del Arco y P.L. Pérez

Departamento de Biología Vegetal (Botánica). Universidad de La Laguna.
38271-La Laguna. Tenerife. Islas Canarias. España.

## ABSTRACT

The *Juniperus* forest ("sabinar") remains of the island of Tenerife are studied in this paper and the new association *Junipero phoeniceae-Oleetum cerasiformis* is described. Likewise, several communities recognized within the limits of the xero-mesophytic transition vegetation between the infra- and thermocanarian bioclimatic belts are analysed and inventaried. A syntaxonomic scheme summarizing all these communities is included.

KEY WORDS: Vegetation, phytosociology, thermic forests, Canary Islands, Tenerife.

## RESUMEN

En el presente trabajo se estudian los restos de sabinares de la Isla de Tenerife y se describe la nueva asociación *Junipero phoeniceae-Oleetum cerasiformis*. Paralelamente se analizan e inventarían diferentes comunidades reconocidas en el ámbito de la vegetación xero-mesófila de transición entre los pisos infra- y termocanario de la Isla. Se incluye para todo ello un completo esquema sintaxonómico.

PALABRAS CLAVE: Vegetación, fitosociología, bosques termófilos, Islas Canarias, Tenerife.

## 1. INTRODUCCION

Las actuales manifestaciones de los bosques termófilos en las Islas Canarias, pueden considerarse como simples restos de formaciones vegetales que cubrieron grandes extensiones en las islas centrales y occidentales del Archipiélago. En este sentido, VIERA Y CLAVIJO, al escribir en 1799 su "Diccionario de Historia Natural de las Islas Canarias", señalaba que *"en mejores siglos se formaron espesos montes bajos de Sabinal en Canarias"* y que, dada la calidad de la leña de sabina, *"combustible semejante al de la tea, se han ido talando imprudentemente las antiguas espesuras de este arbusto tan acreedor a la común estimación"*.

Se puede, pues, pensar que en tiempos prehistóricos los sabinares y otras comunidades termófilas ocuparon mayores extensiones que las actuales, formando parte de un complejo de vegetación xero-mesófila, mediterráneo-norafricano. Junto a las sabinas (*Juniperus phoenicea*), los acebuches (*Olea europaea ssp. cerasiformis*), almácigos (*Pistacia atlantica*) y otras especies originaban un tipo de vegetación de transición con entidad propia, configurada por formaciones puras o ecotónicas con las comunidades arbóreas del piso termocanario subhúmedo y la vegetación xerófila del piso infracanario seco.

En el presente, las mejores muestras de sabinar se hallan en el norte de la Isla de La Gomera y en determinados lugares de las islas de El Hierro y Tenerife. En La Palma y Gran Canaria se conoce la presencia de ejemplares más o menos dispersos en varias localidades. En esta última Isla su presencia es relíctica, aunque por el contrario abundan otros elementos de la transición como el lentisco (*Pistacia lentiscus*) y el acebuche (*Olea europaea* ssp. *cerasiformis*).

## 2. LOS SABINARES TINERFEÑOS

Los restos de la vegetación potencial de las medianías tinerfeñas se localizan con preferencia en ambientes relativamente inaccesibles, paredones, acantilados y andenes de barrancos medianamente alterados, así como en algunas laderas y derrubios situados al pie de estos lugares. *Juniperus phoenicea* se instala en esta Isla prácticamente desde los acantilados costeros, próximos al nivel del mar, hasta sobrepasar en ocasiones altitudes superiores a los 1.000 m s.m. Citas para el piso supracanario (SVENTENIUS [21]) no han vuelto a localizarse. La mayor densidad de ejemplares se encuentra distribuída en las vertientes septentrionales, en la franja de transición entre el piso infracanario y el termocanario subhúmedo, entre los 350 y los 500 m s.m., mientras que en las meridionales lo hace en el termocanario, entre los 600 y los 900 m s.m. En situaciones climáticas favorables el límite inferior del sabinar desciende.

Por otra parte, a estas cotas las lomas y laderas de la Isla han sido desalojadas de la vegetación potencial, a causa de las diferentes alteraciones que ha sufrido el territorio con motivo del uso agrícola y ganadero. Las huertas de jable abandonadas, al igual que muchos de los lomos, presentan un matorral de cobertura variable, desde más o menos laxo hasta bastante denso, donde destacan por su aspecto y colorido los juagarzales y los inciensales. La vegetación terofítica es efímera y se halla fundamentalmente representada por las mismas comunidades señaladas para la Comarca de Agache por RODRIGUEZ [16].

De los restos de sabinares de Tenerife, los existentes en Anaga (Afur, Valle Brosque y Punta de las Sabinas), en La Ladera de Güímar y en Guía de Isora, son los más representativos por su extensión; las demás citas corresponden a ejem-

plares aislados o a pequeñas poblaciones superpuestas a un matorral degradado ubicado a lo largo de una ancha franja del termo-infracanario.

En diversas localidades se ha podido comprobar, además, una notable capacidad de restauración de esta formación (Barranco del Cedro-Tamadaya, Afur, Ladera de Güímar), con cierta recuperación local de de las especies más nobles, lo que nos permite pensar en que es posible una progresiva rehabilitación de este paisaje vegetal, que demanda urgentes medidas de protección y conservación.

En los restos de bosques termófilos tinerfeños se aprecia una complejidad florística extraordinaria, determinada por factores altitudinales, de exposición y de inclinación. De este modo, no se han encontrado sabinares estrictamente puros, pues la mayoría llevan un cortejo florístico heterogéneo en función de la proximidad de estas poblaciones relícticas a las formaciones climácicas vecinas. En altitudes inferiores y exposiciones al sur, los elementos de mayor valencia ecológica del tabaibal-cardonal (*Kleinio-Euphorbion canariensis*) comparten estos hábitats, constituyendo lo que se podría denominar como sabinar seco, en el que las especies más representativas serían *Rubia fruticosa*, *Euphorbia obtusifolia* ssp. *regis-jubae* y *Olea europaea* ssp. *cerasiformis*. Mientras que en cotas superiores y en exposiciones N-NE, afectadas por la humedad de los vientos alisios, se favorece la presencia de elementos de monte verde (*Fayo-Ericion arboreae*). De forma aislada encontramos también sabinares situados en los límites inferiores del área potencial del pinar (*Cisto-Pinion canariensis*).

Los elementos rupícolas (en su mayoría de *Aeonio-Greenovietea*) dan a estos sabinares de cornisas y acantilados un carácter florístico particular, sobre todo en las fisuras de las laderas y en las situaciones de mayor pendiente. Mención especial merece la alta presencia de endemismos locales de las comarcas de Güímar-Abona (*Pericallis lanata, Sonchus gummifer, Crambe arborea*, etc.) y Anaga (*Aeonium lindleyii, A. canariense*, etc.), que intervienen como acompañantes selectos de estas formaciones y que permiten apreciar ciertas diferencias florísticas de marcado carácter comarcal.

En general, como compañeras de alta frecuencia merecen destacarse las especies más agresivas de los matorrales de sustitución, sobre todo los tomillares-juagarzales (*Cisto-Micromerietea hyssopifoliae* Pérez et al. inéd.), que cubren los espacios abiertos de esta comunidad o rodean sus límites exteriores, cuando el grado de umbrofilia y el mantillo del sabinar actúan como factores limitantes para la proliferación de estas especies en su interior. Es considerable la alta presencia de especies introducidas por el hombre, entre las que destaca por su constancia *Opuntia ficus-barbarica*, así como la gramínea Hyparrhenia hirta y el geófito *Asphodelus aestivus*, ampliamente distribuídas en todos los ambientes de las Bandas del Sur.

## 3. DISCUSION SINTAXONOMICA

Los restos de los bosques termófilos canarios se han incluído recientemente en la clase fitosociológica *Oleo cerasiformis-Rhamnetea crenulatae* Santos *in* Rivas-Martínez 1987 que, según su autor, está constituída por "bosquetes y matorrales perennifolio-esclerófilos, que prosperan sobre suelos desarrollados poco profundos, en los pisos bioclimáticos termo e infracanario con ombroclima semiárido o seco... Desde un punto de vista ómbrico ocupa en el termocanario una posición intermedia entre la vegetación árido-semiárida de los tabaibales y cardonales de los litosuelos (*Kleinio-Euphorbion canariensis*) y la subhúmedo-húmeda de los andosoles profundos de la laurisilva (*Ixantho-Laurion azoricae*)". La clase incluye un solo orden: *Oleo cerasiformis-Rhamnetalia crenulatae* Santos 1978.

Según RIVAS-MARTINEZ [14], las comunidades de esta clase "de óptimo canario alcanzan de un modo algo desviante el archipiélago de Madeira... por su estructura y origen de la flora puede considerarse geovicariante de la mediterránea *Quercetea ilicis*, en particular de la de los órdenes *Pistacio-Rhamnetalia alaterni* y *Arganietalia spinosae*, aunque el aporte florístico árido tropical es mucho más acusado... tal vez, incluso, pudiese ser tratada desde un punto de vista sintaxonómico muy sintético como un orden de esta última clase".

Dado el carácter residual y lo sumamente alterados que están los actuales vestigios de esta unidad, la consideración de uno u otro rango depende, desde nuestro punto de vista, más bien de un criterio subjetivo y personal que de un estudio profundo de las unidades de esta clase, escasamente representadas en la vegetación canaria actual. Dado que el espíritu que nos ha guiado en este trabajo es decididamente unificador y clarificador, hemos aceptado provisionalmente la nomenclatura sintaxonómica expuesta por el mencionado autor.

Táxones característicos de la clase y de su único orden en Tenerife son: *Bosea yervamora, Dracaena draco, Globularia salicina, Hypericum canariense, Jasminum odoratissimum, Juniperus phoenicea, Maytenus canariensis, Olea europaea* ssp. *cerasiformis, Phoenix canariensis, Pistacia atlantica, Rhamnus crenulata, Sideroxylon marmulano, Tamus edulis, Visnea mocanera*, etc.

Por coincidir su hábitat con las medianías de las Islas, que fueron ocupadas tras la Conquista para el establecimiento de núcleos de población y habilitación de terrenos para el cultivo, esta clase se encuentra actualmente muy pobremente representada, en comparación con las otras grandes unidades vegetales del Archipiélago.

La única alianza descrita, *Mayteno canariensis-Juniperion phoeniceae* Santos 1980, corresponde a la etapa madura de la macroserie termoinfracanaria semiárido-seca de la sabina (*Juniperus phoenicea*). Como ya hemos indicado, es la forma-

ción más degradada de la vegetación canaria, siendo la sabina el elemento más característico de sus restos actuales.

Recientemente se ha propuesto para esta clase (ARCO & al. [3]), la posible existencia de la "macroserie termocanaria seco-subhúmeda del barbusano o *Apollonias barbujana*" en el territorio climácico de una alianza aún innominada. La única etapa madura conocida dentro de esa virtual alianza la constituye la asociación *Rhamno-Apollonietum barbujanae* Barquín 1984.

Dentro de la alianza *Mayteno-Juniperion* se han descrito las siguientes asociaciones y comunidades para los sabinares de las Islas Canarias:

-As.*Rubio-Juniperetum phoeniceae* Santos 1980 (El Hierro).

-As.*Brachypodio arbusculae-Juniperetum phoeniceae* Fernández 1983 (La Gomera).

-Com.*Juniperus phoeniceae-Olea europaea ssp.cerasiformis* Fernández 1983 (La Gomera, sabinares relícticos de la mitad sur de la isla).

-Com.*Juniperus-Visnea-Apollonias* Fernández 1983 (La Gomera, vegetación termófila de enlace con el piso termocanario subhúmedo).

-As.*Junipero-Rhamnetum crenulatae* Santos 1983 (La Palma).

Desde el punto de vista fitosociológico, no conocemos ningún estudio previo de los sabinares tinerfeños; al menos ésto se desprende de la literatura consultada por nosotros.

## 4. TIPOS DIFERENCIALES EN LA VEGETACION DE TRANSICION DE TENERIFE

Las notas y datos corológicos recogidos en el presente trabajo proceden de numerosas observaciones realizadas en el campo a lo largo de estos últimos 20 años. A su vez, los resultados expresados en la tabla adjunta se han obtenido de inventarios elaborados en este tiempo, iniciados en 1974 y culminados con otros recientes más completos. Destacan los estudios sobre las Bandas del Sur y las comarcas de Anaga, visitadas de forma continuada desde hace mucho tiempo por su gran interés botánico.

Como resultado de dichas observaciones hemos diferenciado en Tenerife las siguientes unidades de vegetación, que incluyen tanto a los distintos tipos de restos de bosques termófilos como a matorrales diversos en los que intervienen elementos de ellos:

- Tabaibal dulce con sabinas
- Tabaibal majorero con sabinas
- Unidad cardón con elementos termófilos
- Espinar
- Almacigal

- Acebuchal
- Sabinar genuino
- Sabinar húmedo
- Pinar con sabinas
- Juagarzal con sabinas

4.1. Tabaibal dulce con sabinas

Los sabinares más áridos, orientados a S y SE, presentan un gran dominio de especies de *Kleinio-Euphorbion canariensis*, pudiendo alcanzar en su límite inferior el dominio del tabaibal dulce, como se observa en la Punta de las Sabinas (Anaga), en un acantilado costero fuertemente afectado por la maresía procedente del oleaje del litoral próximo.

Aunque podría definirse como un sabinar halófilo, su ubicación en el dominio climácico de *Euphorbia balsamifera*, que es la especie dominante, parece aconsejable denominar a esta formación como "tabaibal dulce con sabinas". (Tabla I).

4.2. Tabaibal majorero con sabinas

En las laderas orientadas al N, de los barrancos más profundos de las Bandas del Sur, existen situaciones ecotónicas de los sabinares con los tabaibales majoreros de *Euphorbia atropurpurea* (*Euphorbietum atropurpurae*), de distribución muy concreta.

Por su peculiar fisionomía y composición florística se propone la nueva subasociación *Euphorbietum atropurpurae juniperetosum phoeniceae*, cuyo inventario *typus* es el nº1 de la tabla II.

4.3. Unidad cardón con elementos termófilos

La llamada "unidad cardón" destaca fisionómicamente en el paisaje por el aspecto candelabriforme-suculento-afilo-espinoso de *Euphorbia canariensis* ("cardón), que puede llegar a ocupar una considerable superficie y sobrepasar los 2 m de altura. En ella juegan un papel destacado y constante especies lianoides como *Rubia fruticosa, Periploca laevigata* y *Asparagus umbellatus*, que crecen en su interior de modo exuberante, protegidas ocasionalmente de la acción predadora del ganado caprino.

La distribución altitudinal de los cardones alcanza, en comunidades permanentes, el piso bioclimático termocanario, dando lugar a curiosas situaciones ecotónicas con los elementos residuales de los bosques termófilos, sobre todo con *Juniperus phoenicea, Olea europaea* ssp. *cerasiformis, Pistacia atlantica, Jasminum odoratissimum* y *Rhamnus crenulata*. Particularmente en la vertiente de sotavento, estas unidades sólo se repiten en las laderas orientadas al S de los

Tabla I "Tabaibal dulce con sabinas"

| | |
|---|---|
| Nº | 1 |
| Altitud (m s.m.) | 350 |
| Pendiente (°) | 45 |
| Exposición | SE |
| Cobertura (%) | 80 |
| Superficie ($m^2$) | 200 |
| Nº de especies | 24 |

**Características de *Helianthemo-Euphorbion balsamiferae, Kleinio-Euphorbietalia canariensis, Kleinio-Euphorbietea canariensis***

| | |
|---|---|
| *Euphorbia balsamifera* | 3 |
| *Campylanthus salsoloides* | 1 |
| *Plocama pendula* | 1 |
| *Rubia fruticosa* | 1 |
| *Scilla haemorrhoidalis* | 1 |
| *Teucrium heterophyllum* | 1 |

**Diferenciales del "tabaibal dulce con sabinas"**

| | |
|---|---|
| *Juniperus phoenicea* | 2 |
| *Ceropegia dichotoma* | 2 |
| *Pistacia atlantica* | 1 |

**Compañeras**

- rupícolas

| | |
|---|---|
| *Aeonium lindleyii* | 2 |
| *Lavandula buchii* | 2 |
| *Sonchus radicatus* | 1 |
| *Phagnalon saxatile* | 1 |
| *Polypodium macaronesicum* | 1 |

- otras

| | |
|---|---|
| *Hyparrhenia hirta* | 2 |
| *Asphodelus aestivus* | 2 |
| *Aspalthium bituminosum* | 2 |
| *Sideritis dendrochahorra* | 2 |
| *Lotus glaucus* | 2 |

**Además**: *Micromeria varia* 1, *Opuntia ficus-barbarica* 1, *Argyranthemum sundingii* 1, *Aristida adscensionis* 1, *Pterocephalus virens* +.

**Localidad y fecha del inventario**: Punta de las Sabinas (Anaga), 12.V.1974.

Tabla II "Tabaibal majorero con sabinas"

| | |
|---|---|
| Nº | 1 |
| Altitud (m s.m.) | 600 |
| Pendiente (°) | 45 |
| Exposición | NW |
| Cobertura (%) | 60 |
| Superficie ($m^2$) | 500 |
| Nº de especies | 21 |

Características del *Euphorbietum atropurpureae*

| | |
|---|---|
| *Euphorbia atropurpurea* | 3 |

Características de *Kleinio-Euphorbion canariensis*, *Kleinio-Euphorbietalia canariensis*, *Kleinio-Euphorbietea canariensis*

| | |
|---|---|
| *Euphorbia obtusifolia* ssp. *regis-jubae* | + |
| *Kleinia neriifolia* | + |
| *Rumex lunaria* | + |
| *Rubia fruticosa* | + |
| *Periploca laevigata* | + |
| *Asparagus umbellatus* | + |
| *Taeckholmia microcarpa* | + |

Diferencial del "tabaibal majorero con sabinas"

| | |
|---|---|
| *Juniperus phoenicea* | 3 |

Compañeras

- matorrales de sustitución

| | |
|---|---|
| *Cistus monspeliensis* | 2 |
| *Artemisia thuscula* | 2 |
| *Micromeria hyssopifolia* | 1 |
| *Argyranthemum gracile* | 1 |

- rupícolas

| | |
|---|---|
| *Aeonium holochrysum* | 2 |
| *Carlina salicifolia* | 1 |
| *Phagnalon saxatile* | 1 |
| *Davallia canariensis* | + |

**Además**: *Opuntia ficus-barbarica* 3, *Hyparrhenia hirta* 1, *Bystropogon origanifolius* +, *Asphodelus aestivus* +.

**Localidad y fecha del inventario**: Barranco del Niágara (Guía de Isora), 24.IV.1989.

Tabla III "Unidades cardón con elementos termófilos"

| Nº | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Altitud (m s.m.) | 675 | 650 | 500 | 325 | 500 | 300 | 430 | 450 | 350 | 540 | 650 | 650 |
| Pendiente (°) | 35 | – | 40 | 20 | 40 | 30 | 45 | 60 | 30 | 20 | – | – |
| Exposición | W | E-NE | SE | SE | SE | NE | S | SW | W | NE | NE | NE |
| Cobertura (%) | 90 | 90 | 90 | 100 | 95 | 90 | 100 | 80 | 95 | 95 | 90 | 90 |
| Superficie ($m^2$) | 40 | 50 | 25 | 16 | 20 | 50 | 100 | 25 | 40 | 40 | 35 | 20 |
| Nº de especies | 6 | 11 | 12 | 6 | 10 | 7 | 14 | 8 | 12 | 20 | 7 | 8 |
| **Características de la "unidad cardón"** | | | | | | | | | | | | |
| *Euphorbia canariensis* | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| *Rubia fruticosa* | 2 | 2 | | | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| *Asparagus umbellatus* | 2 | 3 | | | 2 | | 1 | | 1 | | 2 | 3 |
| *Periploca laevigata* | | | 2 | + | | | | 2 | 3 | | | |
| **Características de *Kleinio-Euphorbion canariensis*, *Kleinio-Euphorbietalia canariensis*, *Kleinio-Euphorbietea canariensis*** | | | | | | | | | | | | |
| *Euphorbia obtusifolia* ssp. *regis-jubae* | 1 | | 1 | | 1 | | 2 | 1 | 1 | | 1 | 1 |
| *Kleinia neriifolia* | | | | 1 | + | | 2 | 1 | 1 | | | |
| *Rumex lunaria* | | 1 | | | | | | | | 1 | | |
| *Convolvulus floridus* | | | 2 | | | | | | | | | |
| *Plocama pendula* | | | | | 1 | | | | | | | |
| *Echium aculeatum* | | | + | | | | | | | | | |
| **Diferenciales de la "unidad cardón con elementos termófilos"** | | | | | | | | | | | | |
| *Jasminum odoratissimum* | | | | | | | 2 | 3 | 3 | 2 | | |
| *Rhamnus crenulata* | | | | | | | | | 2 | 2 | 3 | 3 |
| *Descurainia millefolia* | 1 | + | | | | | | | | | | + |
| *Bosea yervamora* | | | | 4 | 3 | | | | | | | |
| *Olea europaea* ssp. *cerasiformis* | | | | | | 2 | 2 | | | | | |
| *Globularia salicina* | | | | | | 2 | 3 | | | | | |
| *Ceropegia dichotoma* | | | | | | | + | | | | 1 | |
| *Juniperus phoenicea* | | | 3 | | | | | | | | | |
| *Erica arborea* | | | | | | | | | | 3 | | |
| *Pistacia atlantica* | | 3 | | | | | | | | | | |
| *Rhamnus integrifolia* | | 2 | | | | | | | | | | |
| *Maytenus canariensis* | 2 | | | | | | | | | | | |
| **Compañeras** | | | | | | | | | | | | |
| – rupícolas | | | | | | | | | | | | |
| *Aeonium urbicum* | | + | + | | | | 1 | + | | | | |
| *Aeonium lindleyii* | | | | | | 2 | 3 | | | | | |
| *Carlina salicifolia* | | | | | | | | | 1 | 1 | | |
| *Todaroa aurea* | | | + | | + | | | | | | | |
| *Taeckholmia pinnata* | | | | 2 | | | | | | | | |
| *Taeckholmia microcarpa* | | | 2 | | | | | | | | | |
| *Aeonium ciliatum* | | | | | | | 2 | | | | | |
| *Aeonium canariense* | | | | | | | 1 | | | | | |
| *Allagopappus dichotomus* | | 1 | | | | | | | | | | |
| *Sonchus acaule* | | | | | | | | | | 1 | | |
| – otras | | | | | | | | | | | | |
| *Opuntia ficus-barbarica* | | 1 | | 2 | | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | | + |
| *Hyparrhenia hirta* | | | 1 | | + | | | | | 2 | | |
| *Micromeria varia* | | | | | | | | | 1 | 1 | | |
| *Asphodelus aestivus* | | | + | | + | | | | | | | |
| *Euphorbia segetalis* | | + | | | | | | | | | | + |
| *Cystus symphytifolius* | | | | | | | | | | | 2 | |

Además en: 3.-*Pallenis spinosa* +; 6.-*Artemisia thuscula* +; 9.-*Aspalthium bituminosum* 1; 10.-*Sideritis dendrochahorra* 1, *Echium leucophaeum* 1, *Paronychia canariensis* 1, *Andryala pinnatifida* 1, *Pericallis tussilaginis* 1, *Brachypodium sylvaticum* 1, *Briza maxima* 1, *Avena barbata* 1, *Melica canariensis* 1.

Localidad y fecha de los inventarios: 1,2,11 y 12.-Bco. del Rey (Arona), 6.XI.1989; 3 y 5.-Bco. del Infierno (Adeje), 6.III.1989; 4.-Bco. Carmona (La Laguna), 11.IV.1988; 6.-Valle Brosque (Anaga), 25.VIII.1988; 7.-Ibid., 28.VIII.1988; 8.-Bco. Hilario (La Laguna), 4.IV.1988; 9.-Bco. Igueste de San Andrés (Anaga), 13.VII.1988; 10.-Las Casillas (Anaga), 13.VII.1988.

Tabla IV "Espinares"

| Nº | 1 | 2 |
|---|---|---|
| Altitud (m s.m.) | 500 | 510 |
| Pendiente (°) | 50 | 20 |
| Exposición | S | N |
| Cobertura (%) | 70 | 80 |
| Superficie ($m^2$) | 100 | 25 |
| Nº de especies | 22 | 20 |
| Características de *Euphorbio-Rhamnetum crenulatae* | | |
| *Rhamnus crenulata* | 2 | 3 |
| Características de *Mayteno-Juniperion phoeniceae, Oleo-Rhamnetalia crenulatae* y *Oleo-Rhamnetea crenulatae* | | |
| *Globularia salicina* | 3 | 1 |
| *Jasminum odoratissimum* | 2 | 1 |
| *Olea europaea* ssp. *cerasiformis* | 1 | + |
| *Convolvulus perraudieri* | | 2 |
| *Ceropegia dichotoma* | + | |
| **Compañeras** | | |
| - de *Kleinio-Euphorbietea canariensis* | | |
| *Periploca laevigata* | 1 | + |
| *Asparagus umbellatus* | 2 | |
| *Kleinia neriifolia* | + | |
| *Euphorbia canariensis* | + | |
| *Euphorbia obtusifolia* ssp. *regis-jubae* | + | |
| *Rumex lunaria* | | + |
| - rupícolas | | |
| *Aeonium urbicum* | 2 | 1 |
| *Pericallis lanata* | + | 2 |
| *Micromeria teneriffae* | 1 | |
| *Lavandula canariensis* | + | |
| - matorrales de sustitución | | |
| *Cistus monspeliensis* | | 1 |
| *Artemisia thuscula* | | + |
| *Micromeria hyssopifolia* | | + |
| - otras | | |
| *Ageratina adenophora* | 1 | 2 |
| *Aspalthium bituminosum* | | 2 |
| *Opuntia ficus-barbarica* | 2 | |
| *Hyparrhenia hirta* | 2 | |
| *Pipthatherum miliaceum* | 1 | + |

**Además en**: 1.-*Polypogon viridis* +, *Cenchrus ciliaris* +, *Dittrichia viscosa* +, *Avena barbata* +; 2.-*Prunus avium* 1, *Lotus sessilifolius* +, *Sanguisorba minor* +, *Torilis arvensis* +, *Phagnalon saxatile* +.

**Localidad y fecha de los inventarios**: Bco. de Pedro Díaz (El Escobonal), 25.V.1980.

distintos barrancos de esta zona de la Isla, ya que por ellas ascienden los cardones a mayor altitud.

Es frecuente en estas formaciones que las especies más representativas de la transición se desarrollen incluso en el interior de *Euphorbia canariensis*, constituyendo unas "unidades cardón" exclusivas de las medianías, caracterizadas por la presencia de *Juniperus phoenicea, Olea europaea* ssp. *cerasiformis* y *Pistacia atlantica*. Estas especiales unidades florísticas se señalan por primera vez en el presente trabajo. (Tabla III).

4.4. Espinar

Los matorrales espinosos que englobamos en este apartado son formaciones cerradas, dominadas por el nanofanerófito *Rhamnus crenulata* ("leña negra" o "espino negro"). Ocasionalmente, en ellos intervienen otras especies características de la transición, como *Globularia salicina* y *Jasminum odoratissimum* o las de mayor valencia de *Kleinio-Euphorbietea canariensis*.

Se localizan en lugares muy degradados de la franja de transición, preferentemente en los cauces de barranco, aunque con menor frecuencia también se pueden presentar en laderas y lomos. Provisionalmente los asimilamos al *Euphorbio-Rhamnetum crenulatae* Barquín 1984. (Tabla IV).

4.5. Almacigal

En los inventarios 1 y 2 de la tabla V, se recojen los restos de lo que pudo ser un tipo de bosque termófilo dominado por la alta presencia de *Pistacia atlantica* ("almácigo"), que en las Bandas del Sur conserva su mejor representación en los municipios de San Miguel y Arona, aunque de manera aislada la mencionada especie está presente en casi todos los barrancos de cierta importancia de esta amplia comarca; formaciones similares se repiten en algunos puntos de la vertiente norte de la Isla.

Junto al almácigo participan en este tipo de vegetación subarbórea, fundamentalmente, *Olea europaea* ssp. *cerasiformis* y *Maytenus canariensis*; mientras que la presencia de *Juniperus phoenicea* es más rara. Podría interpretarse como una facie rica en almácigos del *Junipero phoeniceae-Oleetum cerasiformis* as. nov.

Ocasionalmente se presentan formaciones ecotónicas con los cardonales de *Kleinio-Euphorbietea canariensis*, dando lugar a situaciones como las descritas anteriormente. Cuando en estos ambientes la participación de *Pistacia atlantica* se reduce a unos pocos pies superpuestos a un matorral xérico de degradación, podemos asimilar la formación al *Euphorbio-Rhamnetum crenulatae pistacietosum* de BARQUIN [4].

Algo que llama la atención en los inventarios del Sur es la abundancia de *Rhamnus integrifolia*, especie cuyo rango de distribución altitudinal en la

Tabla V "Acebuchales, almacigares y sabinares"

| Nº | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Altitud (m s.m.) | 410 | 350 | 650 | 650 | 650 | 650 | 640 | 590 | 620 | 550 | 225 | 530 | 540 | 100 | 450 | 570 | 350 | 750 | 400 | 390 | 575 | 500 | 390 | 220 | 365 | 410 | 450 | 750 | 450 | 550 | 750 | 730 | 700 | 700 |
| Pendiente (°) | 25 | 50 | 90 | 85 | 90 | 90 | 85 | 90 | 75 | 60 | 85 | 45 | 70 | 5 | 70 | 50 | 45 | 30 | 85 | 80 | 80 | 75 | 30 | 20 | 70 | 25 | 25 | 70 | 70 | 85 | 30 | 30 | 65 | 75 |
| Exposición | S | S | E | SW | NE | NE | N | N | N | N | S | N | NE | NW | SW | NW | S | N | SE | NW | NNE | NNE | NW | NW | S-SW | S | N | N | NNE | NE | N | N | NNE | N |
| Cobertura (%) | 80 | 75 | 60 | 65 | 90 | 80 | 70 | 60 | 70 | 75 | 60 | 70 | 60 | 30 | 60 | 70 | 75 | 70 | 60 | 75 | 85 | 75 | 70 | 80 | 80 | 70 | 75 | 75 | 50 | 60 | 90 | 80 | 85 | 90 |
| Superficie ($m^2$) | 100 | 500 | 200 | 500 | 200 | 200 | 500 | 25 | 100 | 500 | 300 | 500 | 100 | 400 | 200 | 100 | 50 | 50 | 100 | 500 | 100 | 100 | 1000 | 100 | 500 | 100 | 100 | 100 | 300 | 100 | 50 | 50 | 100 | 100 |
| Nº de especies | 13 | 19 | 9 | 13 | 22 | 12 | 14 | 11 | 20 | 11 | 12 | 15 | 12 | 9 | 19 | 12 | 13 | 13 | 19 | 12 | 9 | 19 | 17 | 17 | 16 | 15 | 23 | 11 | 17 | 13 | 18 | 21 | 15 | 19 |
| Características de *Junipero phoenicese-Oleetum cerasiformis* as.nov. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| *Juniperus phoenicea* | | | | | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 5 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | | 3 | 3 | | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| *Olea europaea* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ssp.*cerasiformis* | 5 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | | | 2 | + | | | 2 | | 3 | 4 | | 1 | 2 | | | | | |
| *Visnea mocanera* | | | | | | | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | | | | | | | | | 1 | | | | | | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| *Maytenus canariensis* | | | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ? | | 1 | | | |
| *Pistacia atlantica* | | | 3 | 3 | 1 | | | | | | | 1 | (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Características de *Mayteno-Juniperion phoeniceae, Oleo-Rhamnetalia crenulatae y Oleo-Rhamnetea crenulatae* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| *Jasminum odoratissimum* | | + | | | 2 | | 1 | 1 | 1 | | | | | 2 | 1 | 3 | | 2 | | | 1 | 3 | + | 1 | | | 1 | 3 | 2 | | 2 | 2 | 2 | 2 |
| *Globularia salicina* | 2 | 2 | | 2 | | | | | | | | 2 | (+) | 1 | 1 | | | | 1 | | | | 3 | | 3 | 2 | + | 1 | | 1 | | | | |
| *Hypericum canariense* | | | | | | | + | | | | | | | 1 | | | | | | | | | + | + | | 1 | + | 1 | 1 | | | 3 | 3 |
| *Rhamnus crenulata* | | | | | 2 | | | 1 | | | | | | | 1 | + | | | | | | | | 2 | | | 1 | | | | | + | 1 |
| *Ceropegia dichotoma* | 3 | | | | 1 | | | | | 2 | | | | | | | | | + | 1 | | | | | + | 2 | | | | | | | |
| *Teline osyroides* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ssp.*sericea* | | | | | | | 3 | | 3 | | | | | | | | | | | | | + | | | | | | | 1 | | | | |
| *Taxus erdulis* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | + | | | | | | 1 | + | | |
| *Rhamnus integrifolia* | | | 1 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| *Descurainia millefolia* | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | + | | | | | | | |
| *Bupleurum salicifolium* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 | | | | | | | | | | | | |
| *Rosea yervamora* | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| *Phoenix canariensis* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | |
| Diferenciales de *ericetosum arboreae* subas.nov. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| *Erica arborea* | | | | | | | (+) | | | (+) | | + | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | |
| *Ilex canariensis* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 1 | 3 | 3 |
| *Arbutus canariensis* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | 2 |
| *Erica scoparia* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ssp.*platycodon* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | + | | | | | | | | | | |
| *Rubus inermis* | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 |
| *Phyllis nobla* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | 1 |
| *Sideritis canariensis* | | | | | | | | | | | | | | | + | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | |
| *Pericallis cruenta* | | | + | | | | | | | | | | | | | | | | | | + | | | | | | | | | | | | | |
| *Picconia excelsa* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | |
| *Teline canariensis* | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| *Myrica faya* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | + | |
| *Pericallis tussilaginis* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | + | | | | | | | |
| Compañeras | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| - de *Kleinio-Euphorbietea canariensis* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| *Euphorbia obtusifolia* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ssp.*regis-jubae* | 1 | 1 | | + | + | | | | + | 2 | 2 | 2 | + | | 2 | | 2 | | 1 | 1 | | + | 1 | | + | 1 | + | | 1 | | | + | | |
| *Rubia fruticosa* | 2 | | | | 2 | + | | | + | | | | | 1 | 1 | 1 | 2 | | | 1 | | | | 2 | | 2 | 1 | + | 1 | | | | 2 | 1 |
| *Ruwer lunaria* | | | | | + | 2 | 1 | | | 2 | | 2 | 1 | | | | | | | | 2 | | | | | | | | 1 | | | | | + |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Lavandula canariensis* | | 2 | | | 1 | | + | | | | | | | 2 | + | | 1 | | | 1 | | | | | 1 | | + | | | | | | | |
| *Kleinia neriifolia* | | + | | | 1 | | | | + | | 1 | | | | | 1 | 1 | | | | | + | + | | | | | | + | | | | | |
| *Periploca laevigata* | 1 | | | | | | | | | | | | + | 1 | | 2 | | | | | | | | | | + | + | | + | | | | | |
| *Euphorbia canariensis* | 1 | | | | | | | | | | 2 | | | | 1 | | | | + | | | | | | | + | | | | | | | | |
| *Euphorbia atropurpurea* | | | | + | | 1 | | | + | | | 2 | (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| *Asparagus umbellatus* | | | | 1 | | + | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| *Taeckholmia microcarpa* | | | | + | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| *Plocama pendula* | | | | | | | | | | | | | | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| *Ceballosia fruticosa* | | | | | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| - de *Cytiso-Pinetea canariensis* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| *Cistus symphytifolius* | | | | | | | | | + | | | | | | | + | | | | | | | | | | | | 1 | + | + | + | 1 | 2 | 2 |
| *Pinus canariensis* | | | | | | | (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | + | | + | | 2 |
| *Echium virescens* | | | | | | | | | + | | | | | | | | | | | | | + | | | | | | | | | + | | | |
| - matorrales de sustitución | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| *Cistus monspeliensis* | | | | | | | 1 | | 1 | 2 | | 3 | 2 | | | | | 2 | | | | 2 | | | | | | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | | + |
| *Artemisia thuscula* | 2 | 2 | | | 1 | | | | | | | 2 | 2 | | 2 | | | | + | | | | + | 1 | | 1 | 2 | | | | | + | | |
| *Micromeria varia* | 1 | 2 | | | | | | | | | 1 | | | | 2 | | 4 | | 1 | 1 | | | 2 | | 1 | 2 | 2 | | | | | | | |
| *Micromeria hyssopifolia* | | | + | | | | | | 1 | | | | | | | + | | 1 | | | | | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | + | + |
| - rupícolas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| *Aeonium holochrysum* | | | 1 | | 1 | 1 | 2 | 1 | | 1 | | 1 | 1 | | + | | | 2 | | | 1 | 1 | | | | | | 2 | | 1 | 2 | 2 | + | |
| *Pericallis lanata* | | | | | 2 | | 2 | 1 | 2 | 2 | | 3 | 2 | | | | | 3 | | | | 1 | | | | | | 2 | | 1 | 3 | 4 | | |
| *Aeonium lindleyii* | + | 2 | | | | | | | | | 3 | | | | 2 | | 3 | | 2 | 1 | | | + | 2 | 2 | 1 | 2 | | | | | | | |
| *Hypericum reflexum* | | + | | 1 | | | | | 2 | 2 | | 1 | 1 | | | | | | + | | | 1 | 2 | | 1 | | | | | + | | | | |
| *Bovallia canariensis* | | | 1 | | + | + | | 1 | | | | | | | | | 1 | | 1 | | | 1 | | 1 | | | | | | | + | 1 | | |
| *Aeonium urbicum* | | 1 | | + | + | 1 | 1 | | + | | | + | | | | | | | 2 | + | | | | | + | | | | | | | | | |
| *Aeonium canariense* | 3 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | + | | + | | | | 2 | + | 2 | + | | | | | | | | |
| *Plantago arborescens* | | 1 | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | + | + | + | 1 | 1 | | | | | | | |
| *Carlina salicifolia* | | + | | + | | + | | 1 | 1 | | | | | | | | | | + | | | | | | | | | | + | | | | | |
| *Sonchus acaulis* | | | | | | + | | | | | | | | | | | | 4 | | | | | | + | | | + | | | | 3 | 3 | | |
| *Phagnalon saxatile* | | | | | | | | | | | | | | | + | | 1 | 1 | | | | | | + | | | | | | | 1 | | | |
| *Sonchus congestus* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | + | 1 | | | | | | | | | | | 1 | 1 |
| *Sonchus gummifer* | | | | | | | + | 1 | | | | | | | | | | | | | + | + | | | | | | | | | | | | |
| *Cheilanthes marantae* | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | 2 | | | | 1 | | | | | | | | | | | |
| *Cheilanthes pulchella* | | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 | | | | | | | | | | | | | | 1 | | |
| *Lobularia intermedia* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| *Tinguarra cervariefolia* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 1 |
| *Taeckholmia pinnata* | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | + | | | | | | | | | | | | | | | |
| - Otras | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| *Asphodelus aestivus* | | | | | | | | | | | 1 | | | | + | 1 | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | 1 | | + | 2 | 2 | | |
| *Hyparrhenia hirta* | | | | | | | | | | | | | 1 | | 3 | + | 2 | | 1 | | | | 1 | | 2 | | 2 | | | | | | | |
| *Opuntia ficus-barbarica* | 1 | 1 | | | 2 | | | | | | 2 | | | | 2 | 3 | | | | | | | | | + | + | | | | | | | | |
| *Drimia maritima* | | | | | | | | | + | 1 | | + | + | | | | | | | + | | | | | + | | | | | | 2 | 3 | | |
| *Aspalthium bituminosum* | | | | | | | | | 1 | 1 | | | | | | | 3 | 1 | | | | | | 2 | | | 2 | | | | | | | |
| *Sideritis dendrochahorra* | | + | | | | | | | | | | | | | | | | | + | + | | | | | | | | | | | | | | |
| *Habenaria tridactylites* | | | | | | | | | | | | | | | | | | + | | | | | | | | | | | | | | 2 | | |

Además en: 1.-*Echium leucophaeum* +; 2.-*Trifolium campestre* +, *Cuscuta planiflora* +; 3.-*Pancratium canariense* +; 16.-*Argyranthemum frutescens* ssp. *frutescens* +; 22.-*Gennaria diphylla* +; 27.-*Paronychia canariensis* 1; 29.-*Pipthatherum coerulescens* 1, *Anthoxanthum aristatum* +; 32.-*Polypodium macaronesicum* 1; 34.-*Canarina canariensis* +, *Adenocarpus foliolosus* +.

Localidad y fecha de los inventarios: 1,2,19,23,25 y 26.-Valle Brosque (Anaga), 25.VIII.1988; 3,4 y 6.-Bco. del Rey (Arona), 6.XI.1989; 5.-Lomo Tamadaya (Arico), 13.XI.1989; 7,8 y 9.-Bco. de Herques (Fasnia), 2.IX.1988; 10,12 y 13.-Ladera de Güimar, 5.IX.1988; 11 y 20.-Valle Brosque (Anaga), 29.VIII.1988; 14.-Riquer (Icod de los Vinos), 30.III.1985; 15 y 27.-Afur (Anaga), 15.V.1989; 16.-Tejina de Guía, 24.IV.1989; 17 y 24.-Afur (Anaga), 21.V.1986; 18,31 y 32.-Ladera de Güimar, 30.XII.1987; 19,23 y 25.-Valle Brosque (Anaga), 25.VIII.1988; 21 y 22.-Bco. Chiñico (Güimar), 20.I.1989; 28.-Ladera de Güimar, 2.I.1989; 29,33 y 34.-Bco. Añavingo (Arafo), 1.XII.1988; 30.-Bco. del Cedro-Tamadaya (Arico), 13.XI.1989.

Comarca de Abona oscila entre los 650 m s.m. y los 2.000 m s.m., altura que a veces es superada; una muy buena representación se halla, entre otros, en el Barranco del Rey, límite de Arona y Adeje, y en el Barranco de Guaría, en Guía de Isora.

### 4.6. Acebuchal

En algunos puntos de Anaga y del Norte de Tenerife, así como en cornisas y andenes de los barrancos más profundos del Sur, hemos reconocido la existencia de unas formaciones boscosas casi arbóreas, dominadas fisionómicamente por el acebuche (*Olea europaea* ssp. *cerasiformis*), que se recojen en los inventarios nº 1, 2 y 26 de la tabla V.

Al encontrarse muy alterados por el hombre, en los acebuchales relictuales participan diversos matorrales, tanto los exclusivos de la transición, aquí representados por *Globularia salicina*, como los de mayor valencia ecológica, en especial dominados por *Artemisia thuscula* y *Micromeria varia*; es significativa también la alta presencia de elementos pioneros del tabaibal-cardonal (*Kleinio-Euphorbion canariensis*), tales como *Euphorbia obtusifolia* ssp. *regis-jubae*, así como de especies introducidas por el hombre, como la tunera (*Opuntia ficus-barbarica*). También parecen corresponder a una facie con acebuches del *Junipero phoeniceae-Oleetum cerasiformis* as. nov.

### 4.7. Sabinar genuino

Los sabinares actuales (*Junipero phoeniceae-Oleetum cerasiformis* as. nov.), según su orientación, se presentan como formaciones relativamente abiertas de nano- o microfanerófitos, que se distinguen de lejos en el paisaje por las características morfológicas y porte llamativo de *Juniperus phoenicea*; los ejemplares más viejos pueden alcanzar los 4 m de altura. En laderas y cumbres expuestas a la acción de los vientos dominantes el sabinar presenta un aspecto arbustivo (1-2 m de altura), con las ramas abanderadas, más o menos cerrado y, en ocasiones, fuertemente adherido al sustrato. Aparte de la sabina, los restantes elementos que caracterizan a estas formaciones de transición son: *Olea europaea* ssp. *cerasiformis*, *Pistacia atlantica*, *Visnea mocanera*, *Maytenus canariensis*, *Jasminum odoratissimum*, *Rhamnus crenulata*, *Ceropegia dichotoma*, etc.

Los restos de esta formación se encuentran ubicados generalmente en acantilados, cornisas o andenes, o sea, en lugares más o menos inaccesibles, con escaso suelo, de los acantilados y barrancos más profundos de la Isla. En los lugares inventariados se ha observado una cierta recuperación de ejemplares jóvenes, lo que nos permite señalar, como ya señalábamos al principio, que es posible una progresiva rehabilitación de este paisaje vegetal, que demanda urgentes medidas de protección y conservación.

Estos sabinares se hallan instalados en el Sur de Tenerife entre los (400) 600 y los 900 m s.m., aunque ejemplares aislados de las diferentes especies que los componen pueden alcanzar los 150 m s.m. Por su parte, en la vertiente de barlovento se sitúan entre los (100) 350 y los 500 m s.m., aunque buenas manifestaciones del sabinar llegan a alcanzar en algunos lugares la franja costera (El Guincho, San Marcos); igualmente, ejemplares más o menos aislados ascienden hasta los 700 m s.m., en el límite inferior del monte-verde. En ambas vertientes, la mayor densidad de ejemplares se localizan en el termo-infracanario; mientras que la comunidad genuina se sitúa en límites más estrechos que los señalados, pues, como veremos más adelante, los ecotonos con las formaciones colindantes pueden ser amplios.

En los sabinares más aclarados, la penetración de elementos de *Kleinio-Euphorbietea canariensis* es notoria, ascendiendo de manera llamativa por las laderas orientadas al S y SO. En la tabla adjunta puede apreciarse la presencia de estas especies en casi todos los inventarios, destacando significativamente: *Euphorbia obtusifolia* ssp.*regis-jubae*, *Rubia fruticosa*, *Lavandula canariensis*, *Kleinia neriifolia*, *Rumex lunaria* y *Periploca laevigata*, que pueden llegar a constituir comunidades arbustivas propias. *Hyparrhenia hirta* origina ocasionalmente densos pastizales en los claros, asimilando la comunidad al *Euphorbio-Rhamnetum crenulatae hyparrhenietosum* (BARQUIN [4]).

Los restos de sabinares estudiados en Tenerife, recogidos en la tabla V, se incluyen en la nueva asociación *Junipero phoeniceae-Oleetum cerasiformis*, tipificada por el inventario nº7.

4.8. Sabinar húmedo

Tanto en la vertiente N como en la S de la Isla de Tenerife existen situaciones climáticas húmedas, que permiten el desarrollo de los llamados sabinares húmedos.

En el barlovento insular es donde éstos adquieren el óptimo, pues el tránsito hacia el termocanario subhúmedo-húmedo se produce normalmente sobre los 350 m s.m., aunque ocasionalmente se da desde los 200 m s.m. En la actualidad se presentan restos de sabinares con etapas seriales de la clímax del monte-verde o con facies empobrecidas de éstos. Los sabinares húmedos de Anaga pueden enriquecerse localmente con *Erica scoparia*.

En la vertiente de sotavento se presentan dos situaciones. La primera se localiza en el Valle de Güímar, donde los sabinares al ganar altitud se mezclan con la laurisilva termófila allí instalada o con sus etapas seriales; en esta situación los elementos más característicos son *Visnea mocanera*, *Juniperus phoenicea*, *Maytenus canariensis*, *Ilex canariensis*, *Arbutus canariensis*, *Picconia excelsa*, *Myrica faya*,... La segunda situación húmeda corresponde a lugares muy

concretos de laderas y cornisas umbrosas de barrancos con exposición local N y NE, situados por encima de los 700 m s.m., donde fragmentos de *Cytiso-Pinetum canariensis* subas. *ericetosum arboreae* contactan con restos de sabinares.

En líneas generales, la participación de los elementos de monte-verde en el sabinar marca la situación ecotónica que describimos como ***Junipero phoeniceae-Oleetum cerasiformis*** subas. ***ericetosum arboreae*** (Tabla V, inventarios nº 18-34; *typus* inventario nº 25).

La humedad ambiental existente en estos sabinares determina el establecimiento de una rica e interesante vegetación criptogámica epífita, fundamentalmente liquénica, que fue estudiada ampliamente por HERNANDEZ PADRON [8] en la Isla de El Hierro, siendo extrapolables para Tenerife las ideas generales que en dicho trabajo se vertían. Tanto las sabinas como los restantes elementos subarbóreos de la transición, sobre todo cuando sobrepasan su dominio climácico y participan en las formaciones de fayal-brezal o de pinar húmedo, presentan también un importante epifitismo briofítico, tal como pusieron de manifiesto LOSADA LIMA *et al.* [11] para la mencionada Isla de El Hierro.

### 4.9. Pinar con sabinas

A lo largo de la vertiente S de la Isla, en cotas inferiores del pinar, o incluso por debajo de sus actuales bordes, se observan ocasionalmente sabinas aisladas o pequeños grupos con algún que otro pino, que son testigo del antiguo ecotono existente como consecuencia de la sucesión en la cliserie altitudinal, entre las formaciones de sabinar y pinar, hoy prácticamente desaparecido. Los inventarios nº 1-8 de la tabla VI muestran esta situación ecotónica y han sido realizados en los escasos relictos que aún se conservan.

Dado el papel decisivo que el pino confiere a la fisionomía del ecotono y a que una situación similar en la Isla de El Hierro (ARCO et al. [2]) ha sido ligada nomenclaturalmente al pinar, nos ha parecido oportuno seguir el mismo criterio, proponiendo por tanto la nueva subasociación ***Cytiso proliferi-Pinetum canariensis*** subas. ***pistacietosum atlanticae***, para incluir el ecotono aludido (entre *Cytiso-Pinetum canariensis* y *Junipero-Oleetum cerasiformis*). Se elige como tipo nomenclatural de la subasociación el inventario nº 5.

La mejor representación vista de este pinar con sabinas se sitúa en la zona de Chío (Guía de Isora) (inventarios 1-4), donde junto al pino destacan con alta frecuencia en la comunidad *Juniperus phoenicea, Pistacia atlantica, Bystropogon origanifolius* y *Argyranthemum phoeniculaceum.*

### 4.10. Juagarzal con sabinas

El desalojo de los bosques termófilos por diferentes aprovechamientos humanos, ha permitido el establecimiento de etapas de sustitución, que en la actua-

Tabla VI "Pinar con sabinas"

| Nº | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Altitud (m s.m.) | 700 | 750 | 750 | 750 | 550 | 575 | 630 | 500 |
| Pendiente (°) | 15 | 45 | 30 | 60 | 85 | 80 | 85 | 70 |
| Exposición | SW | W | W | SW | N-NW | N | N | N |
| Cobertura (%) | 75 | 75 | 60 | 75 | 60 | 70 | 70 | 65 |
| Superficie (m²) | 200 | 100 | 200 | 100 | 100 | 200 | 100 | 500 |
| Nº de especies | 18 | 14 | 18 | 19 | 17 | 14 | 12 | 15 |
| **Características de *Cytiso proliferi-Pinetum canariensis*** | | | | | | | | |
| *Pinus canariensis* | 3 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | |
| *Bystropogon origanifolius* | + | 2 | 2 | 2 | | | | |
| *Argyranthemun foeniculaceun* | | 2 | 2 | 2 | | | | |
| *Chamaecytisus proliferus* | | 2 | 2 | | | | | 1 |
| *Cistus symphytifolius* | | | | | + | | | 2 |
| *Adenocarpus viscosus* | | | | 1 | | | | |
| *Echium virescens* | | | | | + | | | |
| **Diferenciales de *pistacietosum atlanticae* subas.nov.** | | | | | | | | |
| *Juniperus phoenices* | 4 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 |
| *Jasminum odoratissimum* | | | | | + | + | 1 | 3 |
| *Pistacia atlantica* | | | 3 | 2 | | | | 1 |
| *Visnea mocanera* | | | | | 3 | | 1 | |
| *Olea europaea* | | | | | | | | |
| ssp. *cerasiformis* | | | | | | | 2 | 1 |
| *Sideroxylon marmulano* | | | | | | | | 1 |
| *Teline osyroides* | | | | | | | | |
| ssp. *serices* | | | | | | (+) | | |
| **Compañeras** | | | | | | | | |
| - de *Kleinio-Euphorbietea canariensis* | | | | | | | | |
| *Euphorbia obtusifolia* | | | | | | | | |
| ssp. *regis-jubae* | 2 | 1 | 2 | 2 | + | | | 3 |
| *Rubia fruticosa* | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | | |
| *Lavandula canariensis* | | 1 | 2 | 2 | | | 2 | |
| *Kleinia neriifolia* | 1 | | | | | 1 | 1 | 1 |
| *Rumex lunaria* | | | | | | 3 | 2 | 2 |
| *Allagopapus dichotomus* | + | 2 | | | | | | |
| *Periploca laevigata* | 1 | | | | + | | | |
| *Asparagus umbellatus* | 1 | | | + | | | | |
| - de *Cisto monspeliensis-Micromerietea hyssopifoliae* | | | | | | | | |
| *Micromeria hyssopifolia* | | | 1 | 2 | | | | |
| *Cistus monspeliensis* | | | | | + | | | 2 |
| *Artemisia thuscula* | | | | 1 | | | | |
| - de *Aeonio-Greenovietea* | | | | | | | | |
| *Aeonium urbicum* | + | 2 | 2 | + | + | | | |
| *Pericallis lanata* | | | | | 1 | 2 | 1 | 2 |
| *Carlina salicifolia* | 1 | | | | + | + | 2 | |
| *Davallia canariensis* | | | | | 1 | 1 | 2 | |
| *Sonchus gummifer* | | | | | | 2 | 2 | |
| *Aeonium holochrysum* | | | | | 1 | 1 | | |
| *Cheilanthes marantae* | | | | | | 1 | | |
| *Hypericum reflexum* | | | | | + | | | |
| *Lobularia intermedia* | | | | | + | | | |
| - Otras | | | | | | | | |
| *Opuntia ficus-barbarica* | 1 | 1 | | 2 | | 2 | | + |
| *Wahlenbergia lobelioides* | | + | 2 | 1 | | | | + |
| *Hyparrhenia hirta* | | + | 2 | 3 | | | | |
| *Silene vulgaris* | | 1 | + | + | | | | |
| *Asphodelus aestivus* | 1 | | | 1 | | | | |
| *Bromus tectorum* | | | 1 | 1 | | | | |
| *Prunus amigdalinus* | 1 | | 1 | | | | | |
| *Drimia maritima* | | | | | | + | | |

**Además en**: 1.-*Capsella bursa-pastoris* 1, *Euphorbia segetalis* 1, *Centranthus calcitrapa* +, *Argyranthemun gracile* 1; ; 3.-*Polycarpaea aristata* 1, *Ficus carica* +; 8.-*Sideritis* sp. +

**Localidad y fecha de los inventarios**: 1, 2, 3 y 4.-Chío (Guía de Isora), 8.VI.1989; 5.-Bco. del Cedro-Tamadaya (Arico), 13.XI.1989; 6 y 7.-Bco. de Pedro Díaz (El Escobonal-Güímar), 5.IX.1988; 8.-Bco. de Icor (Arico), 5.IV.1989.

Tabla VII "Juagarzal con sabinas"

| | |
|---|---|
| Nº | 1 |
| Altitud (m s.m.) | 600 |
| Pendiente (°) | 70 |
| Exposición | E-NE |
| Cobertura (%) | 85 |
| Superficie ($m^2$) | 100 |
| Nº de especies | 15 |
| **Características de *Cisto-Micromerietea*** | |
| *Cistus monspeliensis* | 4 |
| *Micromeria hyssopifolia* | 1 |
| **Diferenciales del "juagarzal con sabinas"** | |
| *Juniperus phoenicea* | 2 |
| *Visnea mocanera* | 1 |
| *Jasminum odoratissimum* | + |
| *Tamus edulis* | + |
| **Compañeras** | |
| - de *Kleinio-Euphorbietea canariensis* | |
| *Euphorbia obtusifolia* ssp. *regis-jubae* | 2 |
| *Rumex lunaria* | 2 |
| - de *Cytiso-Pinetea canariensis* | |
| *Cistus symphytifolius* | 3 |
| *Echium virescens* | 1 |
| *Chamaecytisus proliferus* | + |

**Además**: *Pericallis lanata* 2, *Erica arborea* +, *Hyparrhenia hirta* +, *Sideritis* sp. +.

Localidad y fecha del inventario: Barranco del Cedro-Tamadaya (Arico), 13. XI.1989.

lidad están caracterizadas por un matorral más o menos denso de nanofanerófitos y caméfitos, con aspecto predominante de juagarzal, en el que las especies más características son *Cistus monspeliensis* y *Micromeria hyssopifolia*.

Es frecuente distinguir entre los elementos dominantes algunas plantas juveniles de las especies más características de la vegetación potencial, tales como *Juniperus phoenicea, Visnea mocanera* y *Jasminum odoratissimum*, lo que denota una clara tendencia a la recuperación de la clímax.

En los ambientes más xéricos, la significativa presencia de *Euphorbia obtusifolia* ssp. *regis-jubae* y *Opuntia ficus-barbarica*, sitúan este matorral muy próximo al *Euphorbio-Rhamnetum crenulatae cistetosum.*

En las Bandas del Sur, en las laderas orientadas al S y SE se incrementa la participación de *Artemisia thuscula* ("insensio") y, en menor medida, de *Argyranthemum frutescens* ssp. *frutescens* ("magarza"), que a veces llegan a constituir matorrales característicos por su particular fisionomía. Mientras que en los lugares más húmedos y, sobre todo, en las situaciones de contacto con los pinares, el matorral se enriquece con *Cistus symphytifolius* ("jara"); esta situación está claramente recogida en el inventario nº 1 de la tabla VII.

## 5. COMENTARIO TAXONOMICO SOBRE *JUNIPERUS PHOENICEA*

Diversos son los autores que han cuestionado la identidad taxonómica de las sabinas canarias, dado el peculiar porte de las mismas y las grandes tallas que frecuentemente presentan, poco comunes o desconocidos en la Región Mediterránea. No obstante, según CEBALLOS & ORTUÑO [5] parece que las diferencias con la de la Península Ibérica y Norte de Africa son insuficientes para justificar una separación taxonómica, aunque es admisible que el aislamiento geográfico, como en tantos otros casos, haya podido originar una raza especial en las islas, considerada como una macroforma respecto al tipo mediterráneo.

Sin embargo, LEBRETON [9] apoyó la validez de la subespecie *canariensis*, que había sido descrita por Guyot en 1968, después de realizar un análisis de las proantocianidinas contenidas en hojas de ejemplares de *Juniperus phoenicea* recolectados en diferentes puntos del Mediterráneo, Norte de Africa y Macaronesia.

## 6. ESQUEMA SINTAXONOMICO

Las comunidades estudiadas y citadas en el presente trabajo quedan recogidas en el siguiente esquema sintaxonómico:

*KLEINIO-EUPHORBIETEA CANARIENSIS* (Rivas Goday & Esteve 1965) Santos 1976

- *Kleinio-Euphorbietalia canariensis* (Rivas Goday & Esteve 1965) Santos 1976

- - *Helianthemo-Euphorbion balsamiferae* Sunding 1972

- - - *Ceropegio fuscae-Euphorbietum balsamiferae* Rivas-Martínez & Wildpret inéd. ("tabaibal dulce")

- - - - "Tabaibal dulce con sabinas"

- - *Kleinio-Euphorbion canariensis* Rivas Goday & Esteve 1965

- - - *Euphorbietum atropurpureae* Lems 1958

- - - - *juniperetosum phoeniceae* subas.nov. ("tabaibal majorero con sabinas")

- - - Comunidad de *Euphorbia canariensis*

- - - - "Unidad cardón con elementos termófilos"

- - - Comunidad de *Rumex lunaria*

- - - Comunidad de *Euphorbia obtusifolia* ssp. *regis-jubae*

- - - Comunidad de *Opuntia ficus-barbarica*

*OLEO CERASIFORMIS-RHAMNETEA CRENULATAE* Santos *in* Rivas-Martínez 1987

- *Oleo cerasiformis-Rhamnetalia crenulatae* Santos 1978

- - *Mayteno canariensis-Juniperion phoeniceae* Santos 1980

- - - *Junipero phoeniceae-Oleetum cerasiformis* as.nov. ("sabinar")

- - - - *ericetosum arboreae* subas.nov. ("sabinar húmedo")

- - - - Comunidad de *Pistacia atlantica* ("almacigal")

- - - - Comunidad de *Olea europaea* ssp. *cerasiformis* ("acebuchal")

- - - *Euphorbio-Rhamnetum crenulatae* Barquín 1984

- - - - *hyparrhenietosum* Barquín 1984

- - - - *pistacietosum* Barquín 1984

- - - - *cistetosum* Barquín 1984

*PRUNO-LAURETEA AZORICAE* Oberdorfer 1960 *em.* 1965

- *Andryalo-Ericetalia arboreae* Oberdorfer 1965

- - *Fayo-Ericion arboreae* Oberdorfer 1965

*CYTISO-PINETEA CANARIENSIS* Rivas Goday & Esteve 1965 *in* Esteve 1969

- *Cytiso-Pinetalia canariensis* Rivas Goday & Esteve 1965 *in* Esteve 1969

- - *Cisto-Pinion canariensis* Esteve 1969

- - - *Cytiso proliferi-Pinetum canariensis* Vogg. 1975 *em.* Del Arco, Pérez & Wildpret 1987

- - - - *ericetosum arboreae* Del Arco, Pérez & Wildpret 1987

- - - - *juniperetosum phoeniceae* Del Arco *et al.* 1990 inéd.

- - - - *pistacietosum atlanticae* subas.nov. ("pinar con sabinas")

*CISTO MONSPELIENSIS-MICROMERIETEA HYSSOPIFOLIAE* Pérez, Del Arco & Wildpret inéd.

- *Cisto monspeliensis-Micromerietalia hyssopifoliae* Pérez, Del Arco & Wildpret inéd.

- - *Cisto monspeliensis-Micromerion hyssopifoliae* Pérez, Del Arco & Wildpret inéd.

- - - *Micromerio-Cistetum monspeliensis* Santos 1980

- - - - "Juagarzal con sabinas"

*AEONIO-GREENOVIETEA* Santos 1976

COMUNIDADES DE UBICACION SINTAXONOMICA INCIERTA (En estudio)

- Matorral de *Argyranthemum frutescens* ssp. *frutescens*

- Matorral de *Artemisia thuscula*

## 7. BIBLIOGRAFIA


(1) ARCO AGUILAR, M.J.DEL, P.L. PEREZ DE PAZ & W. WILDPRET, 1987. Contribución al conocimiento de los pinares de la Isla de Tenerife. *Lazaroa* 7: 67-84 (1987).

(2) ARCO AGUILAR, M.J. DEL, P.L. PEREZ DE PAZ, W. WILDPRET DE LA TORRE, V. LUCIA SAUQUILLO & M. SALAS PASCUAL, 1990. *Atlas cartográfico de los pinares canarios: La Gomera y El Hierro.* 90 pp + 17 mapas. Dirección General de Medio Ambiente y Conservación de la Naturaleza. Consejería de Política Territorial. Gobierno de Canarias.

(3) ARCO AGUILAR, M.J.DEL, J.F. ARDEVOL GONZALEZ & P.L. PEREZ DE PAZ. Contribución al conocimiento de la vegetación de Icod de los Vinos. Tenerife (I. Canarias). *Vieraea.* (En prensa).

(4) BARQUIN DIEZ, E., 1984. *Matorrales de la transición entre el piso basal y el montano de la isla de Tenerife, Canarias.* 268 pp. Tesis Doctoral (no publ.). Facultad de Biología. Universidad de La Laguna.

(5) CEBALLOS, L., & F. ORTUÑO, 1947. Notas sobre Flora Canariense. *Bol. I.F.I.E.* 33: 3-9.

(6) --- 1976. *Vegetación y flora forestal de las Canarias occidentales.* 433 pp. Excmo.Cabildo Insular de Tenerife. Santa Cruz de Tenerife.

(7) FERNANDEZ GALVAN, M., 1983. Esquema de la vegetación potencial de la Isla de La Gomera. *II Congresso Internacional Pro Flora Macaronesica* (19-25 de Junho de 1977): 269-293. Funchal.

(8) HERNANDEZ PADRON, C., 1987. *Flora y Vegetación Liquénica Epífita de los Sabinares Herreños.* 317 pp. + XIV lám. J.Cramer. Bibliotheca Lichenologica.

(9) LEBRETON, P., 1983. Nouvelles données sur la distribution au Portugal et en Espagne des sous-espèces du genévrier de Phénicie (*Juniperus phoenicea* L.). *Agronomia lusit.* 42(1-2): 55-62.

(10) LEMS, K., 1958. Phytogeographic Study of the Canary Islands. *Dissertation. Ann. Arbor.* 2 vols. 204 + 144 pp.

(11) LOSADA LIMA, A., E. BELTRAN TEJERA, C. HERNANDEZ PADRON & W. WILDPRET DE LA TORRE, 1984. Contribución al estudio de los briófitos epífitos de *Juniperus poenicea* L. en la Isla del Hierro (I.Canarias).I. *Anales de Biología*, 2

(Sección especial, 2): 307-317. Secretariado de Publicaciones. Universidad de Murcia.

(12) PEREZ DE PAZ, L., M. DEL ARCO & W. WILDPRET, 1981. Contribución al conocimiento de la flora y vegetación de El Hierro (Islas Canarias).I. *Lagascalia* 10(1): 25-57.

(13) PEREZ DE PAZ, P.L., M.J. DEL ARCO AGUILAR & W. WILDPRET. Contribución al conocimiento de los matorrales de sustitución del Archipiélago Canario. Nuevas comunidades para El Hierro y La Palma. *Vieraea.* (En prensa).

(14) RIVAS-MARTINEZ, S., 1987. *Memoria del Mapa de Series de Vegetación de España.* 268 pp. I.C.O.N.A. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.

(15) RODRIGO PEREZ, J., & V. MONTELONGO PARADA, 1984. Distribución de especies significativas para la comprensión de las formaciones boscosas en Gran Canaria (Islas Canarias).I. *Bot.Macar.* 12-13: 3-16.

(16) RODRIGUEZ DELGADO, O., 1989. *Flora y vegetación de las Bandas del Sur de Tenerife: La Comarca de Agache (Güímar).* 398 pp. Departamento de Biología Vegetal (Botánica). Universidad de La Laguna.

(17) RODRIGUEZ, O., W. WILDPRET, M. DEL ARCO, E. BELTRAN & P.L. PEREZ. Contribución al estudio de los matorrales del Archipiélago Canario. Secuencia catenal en la Comarca de Agache, SE de Tenerife. *Vieraea.* (En prensa).

(18) SANTOS GUERRA, A., 1980. *Contribución al conocimiento de la flora y vegetación de la isla de Hierro (I.Canarias).* 51 pp. Fundación Juan March. Serie Universitaria 114. Madrid.

(19) --- 1983. *Vegetación y Flora de La Palma.* 348 pp. Ed. Interinsular Canaria S.A. Santa Cruz de Tenerife.

(20) SANTOS GUERRA, A., & M. FERNANDEZ GALVAN, 1983. Vegetación del Macizo de Teno. Datos para su conservación. *II Congresso Internacional Pro Flora Macaronesica*: 385-424.

(21) SVENTENIUS, E.R.S., 1946. Notas sobre la Flora de las Cañadas de Tenerife. *Bol.I.N.I.A.* 15(78): 149-171.

(22) VIERA Y CLAVIJO, J., 1982. *Diccionario de Historia Natural de las Islas Canarias.* 467 pp. Excma.Mancomunidad de Cabildos de Las Palmas.

(23) WILDPRET DE LA TORRE, W., & M. DEL ARCO AGUILAR, 1987. España Insular: Las Canarias. In PEINADO & RIVAS-MARTINEZ ed., *La vegetación de España.* 515-544. Colección Aula Abierta. Secretariado de Publicaciones. Universidad de Alcalá de Henares.

Rev.Acad.Canar.Cienc., II, 143 - 167 (1990)

# CONTRIBUCION AL ESTUDIO CLIMATICO Y BIOCLIMATICO DEL SE DE LA ISLA DE TENERIFE: LA COMARCA DE AGACHE (GÜIMAR)

Octavio Rodríguez

Departamento de Biología Vegetal (Botánica). Universidad de La Laguna.
38271-La Laguna. Tenerife. Islas Canarias. España.

ABSTRACT

A climatic and bioclimatic study of the SE of Tenerife (Region of Agache, Güímar) is presented. After a dense analysis of the different climatic factors in that region, several numeric and graphic indices have been computed in order to establish a local climatic classification. Besides, the bioclimatic belts and horizons, the winter types, the ombric types, several numeric bioclimatic indices and the climatic diagrams for the four meteorological stations studied are deduced.

KEY WORDS: Climate, bioclimate, Canary Islands, Tenerife.

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un estudio climático y bioclimático en el SE de la Isla de Tenerife (Comarca de Agache, Güímar). Después de analizar en profundidad los distintos factores climáticos de dicha comarca, se calculan varios índices que permiten realizar una clasificación del clima local, así como diversos diagramas. Luego se calculan los pisos y horizontes bioclimáticos, los tipos de invierno, ombrotipos, índices bioclimáticos y diagramas ombrotérmicos de las cuatro estaciones estudiadas.

PALABRAS CLAVE: Clima, bioclima, Islas Canarias, Tenerife.

## 1. INTRODUCCION

La Comarca de Agache, objeto de nuestro estudio, se halla situada en el SE de la Isla de Tenerife y es considerada, morfológica y geológicamente, como el comienzo de las Bandas del Sur. Administrativamente abarca la mitad meridional del término municipal de Güímar, con una superficie aproximada de 60 km$^2$. Dicho territorio conforma una superficie más o menos triangular, que se extiende desde la dorsal situada en la parte alta y central de Tenerife, aquí representada por las montañas de Izaña (2.386 m s.m.) y El Cabezón (2.398), abriéndose en abanico hasta llegar a la línea de costa, con una considerable pendiente no uniforme. Al norte destaca La Ladera, escarpe muy pronunciado hacia el Valle de Güímar, que puede alcanzar en algunas cotas más de 800 m de desnivel en menos de un kilóme-

tro; mientras que el resto de la superficie se extiende, con una pendiente considerable aunque más moderada (del 20-25%).

Por sus especiales características geomorfológicas, dicha comarca ofrece la posibilidad de hacer un transecto a través de cuatro de los cinco pisos bioclimáticos presentes en Tenerife.

## 2. CLIMA

En la zona estudiada, aunque situada a barlovento, se aprecia la incidencia de los vientos alisios; pues, una vez que éstos inciden en la vertiente opuesta, frenándose en la cordillera dorsal, se descuelgan por el Portillo en la Cumbre de Pedro Gil hasta chocar con la parte superior de La Ladera, apreciándose en este punto unas condiciones climáticas más húmedas que en el resto de la zona Sur de la isla. A medida que descendemos el clima se vuelve cada vez más árido, seco y cálido; mientras que por encima del localizado mar de nubes, y como consecuencia de la inversión térmica, se sitúa una zona también seca, con un clima continental de temperaturas extremas y precipitaciones escasas, que en las cumbres de Izaña son de nieve en invierno y, ocasionalmente, en primavera.

El estudio del clima lo hemos llevado a cabo a partir de los datos facilitados por el ICONA, obtenidos en cuatro estaciones meteorológicas: la que el I.C.I.A. posee en la Finca La Planta, en Güímar, situada a 120 m s.m. por encima de la Montaña Grande, cuyos datos abarcan el período de 15 años comprendido entre septiembre de 1972 y diciembre de 1987; la pluviométrica que el Instituto Nacional de Meteorología tiene en El Escobonal, a 450 m s.m., con una serie de datos de 43 años que se inician en marzo de 1944 y finalizan en diciembre de 1987; el pluviómetro que el ICONA. tiene en Lomo Seco-Lomo Cuchillos, a 1.795 m s.m., cuyos datos cubren dos etapas, del mes de octubre de 1971 al de agosto de 1977 y de diciembre de 1984 al mismo mes de 1987; y, finalmente, contamos con la serie excepcional del Observatorio de Izaña, situada a 2.367 m s.m., que cubre un período de 72 años, entre enero de 1916 y diciembre de 1987.

### 2.1. Temperatura

En la zona costera, según los datos obtenidos en la estación de La Planta, la temperatura presenta una media anual de 19'3°C para el período estudiado, siendo enero el mes más frío con 16'2°C y septiembre el más cálido con 22'8°C. La temperatura media anual de las mínimas es de 15°C, registrándose el valor más bajo de las temperaturas medias de las mínimas en los meses de enero y febrero con 12'2°C; la mínima absoluta es de 6°C, alcanzada el día 21 de enero de 1985. Por el contrario, la temperatura media anual de las máximas es de 23'7°C, correspondiendo el valor más alto de las temperaturas medias de las máximas a los

meses de agosto y septiembre con 27'3°C y la máxima absoluta al 27 de julio de 1982, 10 de agosto de 1976 y 17 de septiembre de 1983, con 39°C. La variación anual de las temperaturas es de 6'6°C.

MARZOL [8] estableció un gradiente altitudinal de la temperatura media para el transecto Güímar-Izaña, que nosotros hemos actualizado siguiendo su mismo método, con los datos más recientes que poseemos, y cuyo valor medio sería de 0'43°C/100 m de desnivel. Los valores mensuales de este gradiente oscilan entre 0'20°C/100 m en el mes de julio y 0'56°C/ 100 m en el mes de diciembre. En cuanto al gradiente absoluto entre esas estaciones, con un desnivel de 2.247 m, alcanza un valor medio de 9'7°C, correspondiento la mínima al mes de julio con 4'4°C y la máxima al de diciembre con 12'7°C.

Con este gradiente podemos conocer aproximadamente la temperatura existente en las dos estaciones que carecen de datos termométricos, El Escobonal y Lomo Seco-Lomo Cuchillos. Así, por lo que respecta a la primera, su temperatura media anual es de 17'9°C, siendo enero el mes más frío con 14'4°C y agosto el más cálido con 22°C; la variación anual de las temperaturas sería de 7'6°C. En Lomo Seco-Lomo Cuchillos la temperatura media aproximada sería de 12'1°C, siendo también enero el mes más frío con 7'2°C y agosto el más cálido con 19°C; la variación anual de las temperaturas sería de 11'8°C.

Por último, en la cumbre de la comarca, según los datos de Izaña, la temperatura presenta una media anual de 9'6°C para el período estudiado, siendo enero el mes más frío con 4'1°C y julio el más cálido con 17'8°C. La temperatura media anual de las mínimas es de 5'7°C, registrándose el valor más bajo de las temperaturas medias de las mínimas en el mes de enero con 0'8°C; la mínima absoluta se alcanzó el 13 de abril de 1954 con -8'2°C. Con respecto a la temperatura media anual de las máximas, ésta se eleva a 13'6°C, correspondiendo el valor más alto de las temperaturas medias de las máximas al mes de julio con 22'4°C, siendo la máxima absoluta la alcanzada los días 27 y 29 de julio de 1987 con 29'2°C. La variación anual de las temperaturas sería de 13'7°C.

## 2.2. Pluviometría

En esta comarca los datos pluviométricos obtenidos varían ostensiblemente según la estación meteorológica de que se trate. Así, en la Finca La Planta la precipitación total media del período de observación es de 167'3 mm al año, siendo abril el mes más lluvioso con 38'6 mm de media (aunque este dato puede llevar a confusión ya que se debe en gran medida al temporal de 1977), seguido de enero con 33'2 mm; la máxima absoluta correspondió al año 1977 con 575'1 mm, de los cuales 476'4 mm cayeron en el mes de abril, con una máxima en un día en el mismo mes de 273 mm, siguiéndole el año 1979 con 246'2 mm, de los que 227'4 mm cayeron en enero, y de ellos 88'7 mm en un solo día. Por el contrario, el año

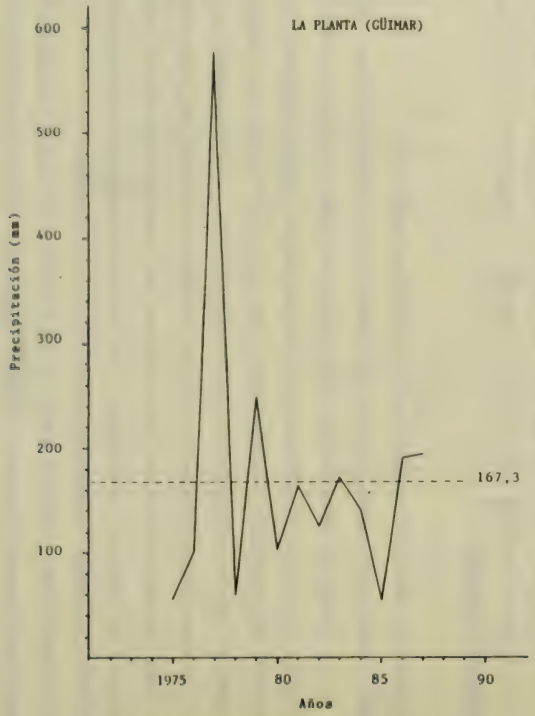
más seco fue 1985, con una precipitación anual de 54'5 mm. El mes de menor precipitación media corresponde a agosto, con 0'2 mm, siendo frecuentes períodos de más de tres meses de precipitación nula, algunos de hasta 7 consecutivos, como ocurrió en los años 1975 y 1986.

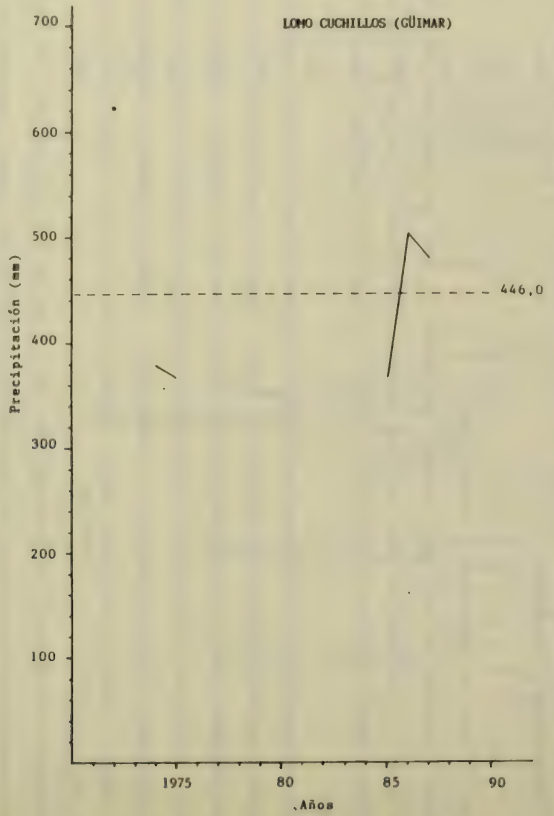
En El Escobonal la precipitación total media registrada alcanzó los 311'4 mm anuales, correspondiendo a noviembre el mes más lluvioso con 54'8 mm de media. La máxima absoluta del período estudiado se alcanzó en el año 1956 con 914'2 mm, de los cuales cayeron 514'7 en el mes de enero y de ellos 149'5 en un único día; el récord de precipitación en un día se obtuvo en abril de 1977 con 220 mm, que a lo largo del mes se elevaron a 438'6 mm. En cuanto al año más seco fue 1947 con 55'3 mm. El mes de menor precipitación media corresponde a julio con 0'9 mm (en los 44 años sólo ha llovido en este mes en cuatro ocasiones), siendo frecuentes períodos de tres meses consecutivos de precipitación nula, que excepcionalmente pueden llegar a extenderse a siete meses, como ocurrió en el año 1978.

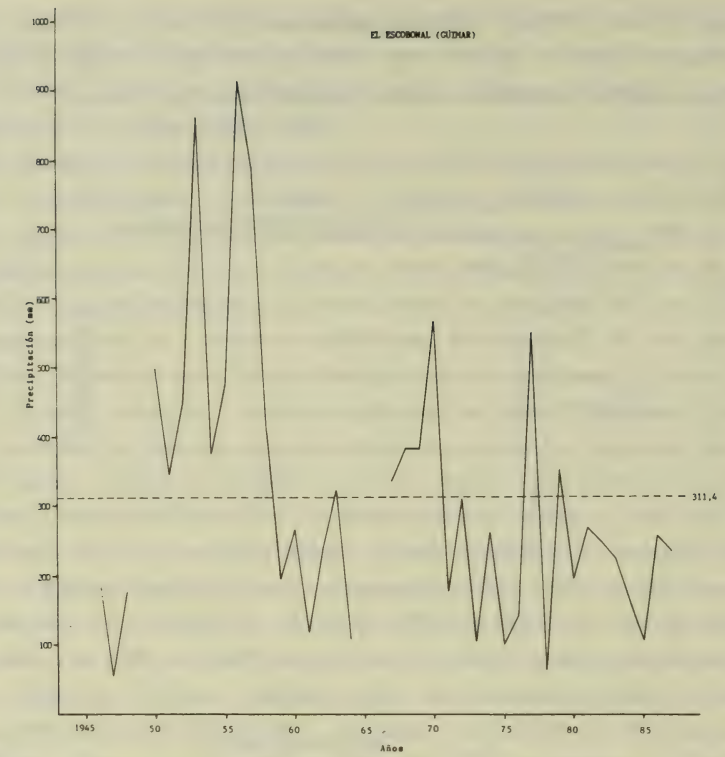
En Lomo Seco-Lomo Cuchillos la precipitación media es de 446 mm para el corto período del que existen datos, siendo diciembre el mes más lluvioso con 96'5 mm. La máxima absoluta anual corresponde al año 1972 con 621'9 mm, mientras que la mensual se alcanzó en abril de 1977 con 226'2 mm. Por el contrario, el año más seco fue 1975 con 366'8 mm. El mes de menor precipitación media corresponde a julio con 0'2 mm; habiendo sido la pluviometría nula en los meses de marzo de 1975, mayo de 1973 y 1987, junio de 1972,73,86 y 87, julio de 1972, 74,75,85,86 y 87, agosto de 1972,74,75,85,86 y 87, septiembre de 1985 y octubre de este mismo año.

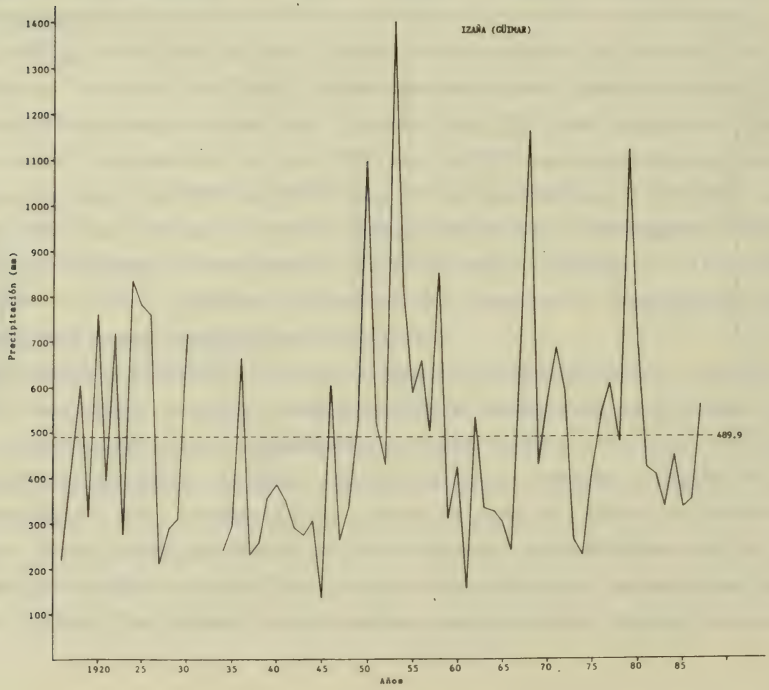
En Izaña la precipitación total media registrada en el período de 72 años estudiado, ha sido de 489'9 mm (aproximadamente una cuarta parte en forma de nieve), siendo noviembre el mes más lluvioso con 113'4 mm de media. La máxima absoluta anual corresponde al año 1953 con 1.394'6 mm, mientras que la mensual se alcanzó en enero de 1979 con 957'4 mm. Por el contrario, el año más seco fue 1945 con 137'8 mm. El mes de menor precipitación media corresponde a julio con 0'3 mm; registrándose frecuentemente una pluviometría nula en los tres meses del verano, pero que en ocasiones pueden ser más, como es el caso del año 1927 con un período de 8 meses consecutivos sin lluvia.

Según CEBALLOS & ORTUÑO [2], los valores de la precipitación son, en realidad, algo más altos que los consignados para Izaña, pues en la mayoría de los casos la lluvia ocurre aquí acompañada de fuerte viento, por lo que el pluviómetro recibe una cantidad de agua inferior a la que hubiese recogido en calma o con viento flojo. Son frecuentes los casos en que la lluvia es prácticamente horizontal. Otra forma importante de precipitación, no registrada por el pluviómetro, es la cenceñada o cencellada, que a veces adquiere extraordinaria importancia al cubrir las retamas de una espesa capa de hielo. También hay que tener


LA PLANTA (GÜIMAR)
Precipitación (mm)
600
500
400
300
200
100
167,3
1975
80
85
90
Años


LOMO CUCHILLOS (GÜIMAR)
Precipitación (mm)
700
600
500
400
300
200
100
446,0
1975
80
85
90
Años


EL ESCOBONAL (GÜIMAR)
Precipitación (mm)
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
311,4
1945
50
55
60
65
70
75
80
85
Años


IZAÑA (GÜIMAR)
Precipitación (mm)
1400
1300
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
489,9
1920
25
30
35
40
45
50
55
60
65
70
75
80
85
Años

en cuenta las nieblas húmedas. Tampoco debemos olvidar las posibles tormentas de lluvia y granizo que, aunque poco frecuentes, se pueden presentar en cualquier mes, aunque con mayor probabilidad en otoño e invierno.

Como se ha podido comprobar, los valores mensuales registrados en toda la comarca han llegado a ser muy importantes en varias ocasiones, debido generalmente a lluvias de carácter torrencial caídas en cortos períodos de tiempo, poco aprovechables desde el punto de vista agrícola, y responsables de graves daños en terrenos de cultivo y viviendas. No obstante, hay que tener en cuenta la presencia de lloviznas y ligeras precipitaciones inapreciables, de gran importancia en el grado de saturación del aire; así como el papel decisivo que juegan las masas forestales como fuente importante en la captación del agua atmosférica, mediante lo que se conoce como "lluvia horizontal".

## 2.3. Humedad relativa

En la franja costera de dicha comarca, y comparando los datos de que disponemos en La Planta con los que nos ha facilitado ICONA de Santa Cruz de Tenerife, la humedad relativa podría oscilar en torno a un 63%, siendo noviembre el que presenta un valor medio más elevado, con un 68%, y julio el que lo presenta más bajo, con un 56%. Es de destacar en estos valores, bajos durante todo el año, su incremento a comienzos de la época estival en el mes de junio, debido probablemente a la acción de la brisa marina, que puede llevar consigo un aporte considerable de humedad, potenciada por los vientos predominantes al inicio de dicha estación.

A medida que se asciende, hasta llegar a la cota de 1.000 m s.m. en Anocheza, la humedad relativa también va aumentando. Comparativamente pueden utilizarse para esta zona los datos de la estación de Los Rodeos, según los cuales se podrían alcanzar unos valores medios en torno a un 73%, siendo diciembre y enero los meses de valores más altos, con un 77%, y julio el de más bajo, con un 67%. Todavía se observa en esta zona un pequeño incremento del valor al comienzo del verano.

Desde estas alturas intermedias hasta la cumbre, la humedad relativa vuelve a descender, alcanzándose unos valores medios inferiores a los de la costa. Así, en Izaña la media es del 46%, siendo noviembre el mes de valor más elevado, con un 57%, y julio el más bajo, con un 28%.

## 2.4. Insolación y nubosidad

Según los escasos datos de que se disponen para la zona de estudio, en la franja inferior, muy por debajo de los estratocúmulos, la presencia de niebla es nula en todo el año, existiendo un predominio de los días despejados sobre los nublados o cubiertos, siendo julio y agosto los meses de mayor insolación,

con unas 10 horas de luz solar al día, mientras que noviembre y diciembre son los que más carecen de ella, con tan solo unas 5 horas diarias. En conjunto, los meses de mayor número de horas de luz solar serían los de verano, junio-agosto, mientras que los de menor corresponderían a los del invierno, noviembre-febrero.

Al ascender comienza a observarse un aumento de la nubosidad, que a cotas superiores a los 800 m s.m. dan lugar a un predominio de los días nublados o cubiertos sobre los despejados; los meses con mayor insolación son los de julio y agosto, y los de mayor nubosidad noviembre y diciembre. En esta zona, sometida a la acción de los vientos alisios, la presencia de niebla es significativa a lo largo del año.

A medida que abandonamos la influencia del mar de nubes y nos acercamos a la cumbre, se observa un aumento de la insolación, que llega a imponerse claramente sobre la nubosidad. Así, en Izaña los meses de mayor número de horas de luz solar son los de verano, destacando junio con una media de 12 horas al día; mientras que los de menor número son noviembre y diciembre con unas 7 horas diarias.

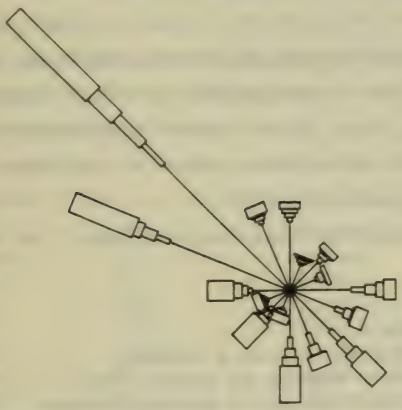
## 2.5. Viento

La mitad inferior de la comarca en estudio ha sido siempre muy castigada por este factor meteorológico, por lo que se la ha denominado popularmente entre sus habitantes como "la tierra del viento", registrándose un porcentaje de calmas que raramente supera el 15% de los días, predominando éstas en otoño e invierno. Los vientos predominantes en la zona costera son los procedentes del NE, siguiéndole los del N y E. Por estar esta zona al abrigo del alisio, se establecerán claramente las brisas, cuyo régimen se caracteriza fundamentalmente en verano por un giro diurno de 90° en la dirección del viento.

Al ascender adquieren cierto relieve los vientos del S, cuya preponderancia se pone de manifiesto, sobre todo, con el llamado "tiempo sur", Harmatan o "viento de Levante", con aire cálido procedente del Sahara, cargado de calima y, en raras ocasiones, de langostas.

Por encima de las medianías, hasta la cumbre, se aprecia el dominio a lo largo del año de los vientos del NW que, en la franja comprendida entre los 800 m s.m. y los 1.300 m s.m., van cargados de humedad, pues corresponden a los vientos alisios, que inciden en esta zona fundamentalmente en verano. En Izaña sopla el viento casi todo el año, aunque con una velocidad que no suele superar los 18 km/h, siendo los procedentes del NW los predominantes, con notable diferencia, tanto en verano como en invierno; en esta última estación se producen también con cierta frecuencia los del SE y S, mientras que en verano el segundo más significativo sería el viento del E. Por lo general se observa que los vientos de otoño-invierno son más fuertes que los de primavera-verano.

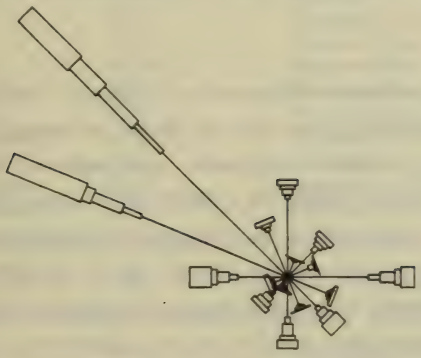
IZAÑA PERIODO ENERO 1946 – 1986



LEYENDA

5 % OBSER. HORARIAS
0.5 < V <= 15.0 KM/H
15.0 < V <= 20.0 KM/H
20.0 < V <= 25.0 KM/H
25.0 < V <= 30.0 KM/H
30.0 < V KM/H
OBS. CALMAS 9.0 %
OBS VARIABLES 0.0 %

IZAÑA PERIODO AGOSTO 1946 – 1986



LEYENDA

5 % OBSER. HORARIAS
0.5 < V <= 15.0 KM/H
15.0 < V <= 20.0 KM/H
20.0 < V <= 25.0 KM/H
25.0 < V <= 30.0 KM/H
30.0 < V KM/H
OBS. CALMAS 13.2 %
OBS VARIABLES 0.1 %

## 2.6. Indices climáticos y clasificación del clima

Con los datos enumerados hasta aquí se han calculado una serie de índices y realizado diversos diagramas, que nos pueden dar una aproximación a la clasificación climática de la zona estudiada.

2.6.1. Indice de LANG.- Lang formuló un índice climático general, de los más simples, con el fin de establecer una clasificación de las distintas zonas climáticas en todo el mundo, al que llamó "Regen-faktor" (RODRIGUEZ [13]). Este índice se obtiene hallando simplemente el cociente entre la precipitación total anual en mm y la temperatura media anual en °C (P/T).

El mismo autor establece la siguiente clasificación según los valores de P/T:

```
  0 -  20 ..... Desierto
 20 -  40 ..... Climas áridos
 40 -  60 ..... Climas húmedos de estepas y sabanas
 60 - 100 ..... Climas de zonas húmedas de bosque claro
100 - 160 ..... Climas de zonas húmedas de grandes bosques
    > 160 ..... Climas de zonas superhúmedas con prados y tundras
```

Para la Comarca de Agache hemos comprobado que en la parte inferior, donde se ubica la estación de La Planta, el Regen-faktor da un valor de 8'7, lo que correspondería según Lang a un clima de "desierto". Por encima, en El Escobonal, el valor de este índice sería de 17'4, por lo entraría también en el mismo clima de "desierto". Ya en la estación de Lomo Cuchillos el valor ascendería a 36'8, lo que la situaría en un "clima árido". Finalmente, en la cumbre, según los datos de Izaña, el valor del índice sería de 51, correspondiendo a un "clima húmedo de estepas y sabanas".

2.6.2. Indice de MARTONNE.- Martonne estableció el llamado "índice de aridez" para llevar a cabo estudios hidrológicos, pero el mismo se encuentra en la actualidad ampliamente difundido, siendo utilizado para señalar las grandes oposiciones climáticas y biogeográficas (HUETZ DE LEMPS [6]). Este índice presenta la ventaja respecto al Regen-faktor de eliminar los valores muy altos cuando la temperatura tiende a 0°C, sumando 10 al factor de T (A=P/T+10). Ello es de suma importancia, si tenemos en cuenta que en regiones extremadamente frías las medias de T pueden ser negativas, con lo que el índice de LANG no se podría aplicar.

Según los valores de A se estableció la siguiente clasificación:

```
A ≥ 20      ..... Clima con humedad suficiente
A = 10 - 20 ..... Clima con tendencia a la sequedad
A =  5 - 10 ..... Clima árido
A ≤       5 ..... Clima hiperárido
```

Este índice anual se puede completar con un índice mensual, tomando los

valores de precipitación y temperatura media del mes y multiplicando por 12 la precipitación: a = 12p/t+10, donde

p = pluviometría total mensual en mm

t = temperatura media mensual en °C

De este modo, se observa la variación anual del índice "a" de Martonne según las medias mensuales, y con los datos obtenidos se puede desdoblar el año climático en meses con humedad suficiente, meses con tendencia a la sequedad, meses áridos y meses hiperáridos.

En el caso de La Planta, A = 5'7, con lo que dicha zona queda incluída en un clima "árido". Para los valores mensuales se ha elaborado la siguiente tabla:

| | | |
|---|---|---|
| Enero | 15'2 ..... | Tendencia a la sequedad |
| Febrero | 8'5 ..... | Aridez |
| Marzo | 5'4 ..... | Aridez |
| Abril | 16'6 ..... | Tendencia a la sequedad |
| Mayo | 0'3 ..... | Hiperaridez |
| Junio | 0'9 ..... | Hiperaridez |
| Julio | 0'1 ..... | Hiperaridez |
| Agosto | 0'1 ..... | Hiperaridez |
| Septiembre | 1'7 ..... | Hiperaridez |
| Octubre | 7'5 ..... | Aridez |
| Noviembre | 7'2 ..... | Aridez |
| Diciembre | 8'4 ..... | Aridez |

En lo que se refiere a El Escobonal, A = 11'2, por lo que se englobaría en un clima con "tendencia a la sequedad". Mientras que los valores mensuales serían:

| | | |
|---|---|---|
| Enero | 26'3 ..... | Humedad suficiente |
| Febrero | 25'8 ..... | Humedad suficiente |
| Marzo | 9'8 ..... | Aridez |
| Abril | 10'4 ..... | Tendencia a la sequedad |
| Mayo | 3'5 ..... | Hiperaridez |
| Junio | 0'9 ..... | Hiperaridez |
| Julio | 0'3 ..... | Hiperaridez |
| Agosto | 0'4 ..... | Hiperaridez |
| Septiembre | 4'2 ..... | Hiperaridez |
| Octubre | 17'3 ..... | Tendencia a la sequedad |
| Noviembre | 23'9 ..... | Humedad suficiente |
| Diciembre | 19'3 ..... | Tendencia a la sequedad |

En la estación de Lomo Seco-Lomo Cuchillos A = 20'2, por lo que se correspondería con un clima con "humedad suficiente", aunque en su límite más bajo. Los valores mensuales quedan reflejados a continuación:

| | | |
|---|---|---|
| Enero | 46'6 ..... | Humedad suficiente |
| Febrero | 50'6 ..... | Humedad suficiente |
| Marzo | 31'4 ..... | Humedad suficiente |
| Abril | 37'3 ..... | Humedad suficiente |
| Mayo | 1'1 ..... | Hiperaridez |
| Junio | 0'5 ..... | Hiperaridez |
| Julio | 0'1 ..... | Hiperaridez |
| Agosto | 0'7 ..... | Hiperaridez |
| Septiembre | 5'8 ..... | Aridez |
| Octubre | 16'7 ..... | Tendencia a la sequedad |
| Noviembre | 29'1 ..... | Humedad suficiente |

| | | |
|---|---|---|
| Diciembre | 65'4 ..... | Humedad suficiente |

Por último, en Izaña A = 25'0, con lo que se incluye también en un clima con "humedad suficiente". Mensualmente se obtienen los siguientes valores:

| | | |
|---|---|---|
| Enero | 67'5 ..... | Humedad suficiente |
| Febrero | 48'7 ..... | Humedad suficiente |
| Marzo | 34'0 ..... | Humedad suficiente |
| Abril | 22'3 ..... | Humedad suficiente |
| Mayo | 7'5 ..... | Aridez |
| Junio | 0'7 ..... | Hiperaridez |
| Julio | 0'1 ..... | Hiperaridez |
| Agosto | 0'7 ..... | Hiperaridez |
| Septiembre | 7'6 ..... | Aridez |
| Octubre | 29'2 ..... | Humedad suficiente |
| Noviembre | 79'6 ..... | Humedad suficiente |
| Diciembre | 68'1 ..... | Humedad suficiente |

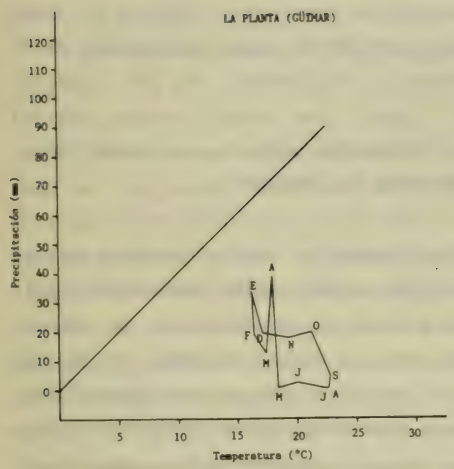
2.6.3. Climatograma.- La técnica empleada en la construcción de climatogramas consiste en representar en abscisas las temperaturas medias mensuales y en ordenadas la pluviometría mensual en mm, siendo la escala de ésta 4 veces superior a la de temperatura. Al unir con una línea los 12 puntos correspondientes a los meses del año, tendremos el climatograma del área de estudio.

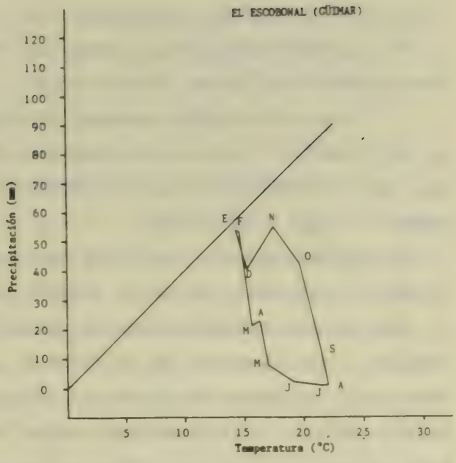
Una figura globulosa es representativa de un clima poco contrastado, mientras que si resulta alargada el clima distingue entre estaciones térmicas y pluviométricas. Si este alargamiento se efectúa según la bisectriz de los ejes de coordenadas el clima es de tipo "xerochiménico", es decir, los meses más fríos son a la vez los más secos; mientras que si la orientación de la gráfica es más o menos perpendicular a dicha bisectriz, los meses fríos serán los más lluviosos (clima "xerotérico"). Este último caso es el que nos ocupa en la zona de estudio, observándose que los meses situados por debajo de la bisectriz son los más secos, que en el caso de La Planta, con los datos que poseemos, serían todos.

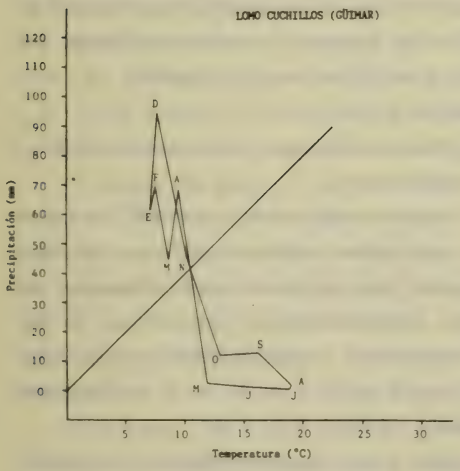
2.6.4. Clasificación climática de THORNTHWAITE.- El climatólogo norteamericano Thornthwaite estableció una clasificación climática algo más compleja (HUETZ DE LEMPS [6]). En ella interviene de manera fundamental el valor de "evapotranspiración potencial", es decir, la cantidad de agua evaporada de la superficie del suelo más la transpirada por las plantas que viven sobre ese suelo. Representa por tanto el transporte de agua del suelo a la atmósfera, o sea, lo contrario de la precipitación.

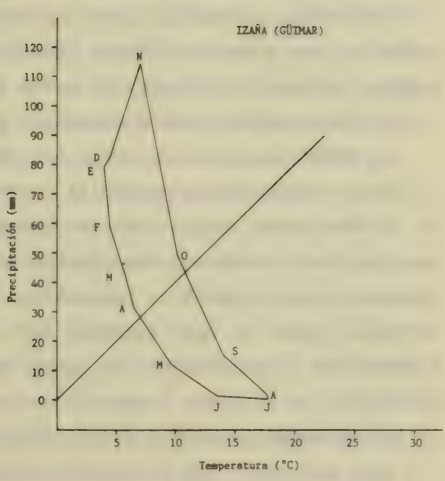
Según Tames (1949) la evaporación depende del clima, humedad del suelo, cubierta vegetal, empleo del suelo, etc. (RODRIGUEZ [13]). Este factor que C.W. Thornthwaite denominó "e" está estrechamente relacionado con la temperatura media mensual, siempre que se hagan las correcciones correspondientes a la variación en la duración del día y al número de días de cada mes. El autor

# CLIMATOGRAMAS



dedujo una fórmula empírica para el cálculo de dicho factor, que permite calcular la evapotranspiración potencial de un lugar conociendo su latitud y las temperaturas medias de cada mes. Esta fórmula es:

$e = 1'6\ (10t/I)^a$. Siendo:

e = evapotranspiración potencial mensual en cm de agua, para meses de 30 días y días de 12 horas de luz solar.

t = temperatura media mensual en °C.

a = constante para cada estación, que se determina según la siguiente fórmula: $a = 0'000000675\ I^3 - 0'0000771\ I^2 + 0'01792\ I + 0'49239$

donde $I = \Sigma_1^{12}\ (t/5)^{1'514}$

El cálculo directo de "e" es muy complicado, pero se simplifica mucho usando el ábaco y la tabla que da el autor, con valores ya calculados (RODRIGUEZ [13]).

Una vez determinado el valor de "e", se multiplica por un factor de corrección, el cual depende de la latitud, para tener en cuenta el número de días de cada mes y las horas de luz solar de cada uno de ellos. Sus valores mensuales se hallan también calculados en tablas para el caso de Canarias (RODRIGUEZ [13]). Este producto de "e" por el factor de corrección corresponde a la evapotranspiración potencial mensual en cm.

Los datos necesarios para la clasificación del clima según Thornthwaite se reúnen en las llamadas "Fichas Climáticas", las cuales llevan en columnas los valores correspondientes a los meses de año y en filas los siguientes:

1) Temperaturas medias mensuales y anuales en °C.

2) Evapotranspiración potencial (ETP), también llamada "necesidad de agua".

3) Precipitaciones mensuales y total anual en mm.

4) Variación de la reserva: Cuando la evapotranspiración potencial es mayor que las precipitaciones las plantas se ven afectadas, pudiendo utilizar el agua disponible en el suelo. La cantidad de agua que un suelo puede almacenar es variable, según la naturaleza de éste y la distribución de las raíces de las plantas que crecen sobre él; pero teóricamente se puede suponer que el agua disponible en un suelo (reserva) de consistencia media y de 50 cm de profundidad es la equivalente a 100 m de lluvia (RODRIGUEZ [13]).

Así, mientras las precipitaciones excedan a la evapotranspiración potencial no hay variación en el agua almacenada en el suelo; pero sí existe en los meses en que la ETP es mayor que la pluviometría, ya que las plantas utilizan este agua almacenada en el suelo hasta agotarla totalmente (variación negativa de la reserva); posteriormente, cuando la lluvia vuelve a exceder a la ETP comenzará a almacenarse agua en el suelo (variación positiva de la reserva).

En Agache observa que, salvo en La Planta, en primavera se empieza a utilizar el agua del suelo hasta su agotamiento, como máximo, en el mes de junio. Tras los meses del verano con carencia de reserva, en otoño se comienza a alma-

cenar de nuevo agua en el suelo, hasta que, en las estaciones meteorológicas situadas a mayor altitud, se recargan totalmente a comienzos del año.

5) Reserva de agua en el suelo: En nuestro caso solamente es máxima en los meses de invierno en las dos estaciones más elevadas, donde no existe tal reserva en los meses de verano. Mientras que en La Planta la reserva está ausente a lo largo del año, apareciendo solamente en El Escobonal en los meses de enero y febrero, pero en ningún caso llega a alcanzar su máximo valor.

6) Evapotranspiración actual (EVT): Este concepto equivale a la cantidad de agua que se pierde realmente por evaporación y por transpiración, mientras que la evapotranspiración potencial (ETP) es la que se perdería por dichos conceptos, si existiese agua suficiente en el suelo. Por tanto, cuando la precipitación excede a la ETP la evapotranspiración actual coincide con ésta; mientras que en los meses en los que se está utilizando el agua del suelo, la pérdida de agua o EVT incluye tanto al agua de lluvia como a la reserva del suelo. En los meses en que la reserva es nula, la evapotranspiración actual sólo incluye el agua de lluvia, siendo, por tanto, igual a la precipitación.

7) Falta de agua: Es la diferencia entre la evapotranspiración potencial y la actual. En la zona de estudio la falta de agua varía con la altitud; así, en La Planta está presente en todos los meses del año, con un total anual de 727'1 mm; en El Escobonal sólo está ausente en enero y febrero, alcanzando un total anual de 520 mm; en Lomo Cuchillos sólo hay falta de agua entre junio y octubre y el total anual se ha reducido a 324'1 mm; finalmente, en Izaña existe solamente en los meses de verano (junio-septiembre), con un total anual de 279'4 mm.

8) Exceso de agua: Es la diferencia entre la precipitación y la suma del valor de ETP y la variación positiva de la reserva. En nuestro caso, también se van a obtener valores diferentes para las distintas estaciones; en La Planta no hay exceso de agua en ningún mes del año, lo mismo que en El Escobonal; mientras que en Lomo Cuchillos existe exceso entre enero y abril, con un total anual de 110'9 mm, que en Izaña se eleva a 170'3 mm, pero distribuido entre diciembre y marzo.

9) Desagüe: Para este cálculo se supone que el 50% del exceso de cada mes es retenido en el suelo hasta el mes siguiente.

Una vez elaborada la Ficha Climática, representamos los diagramas de falta y exceso de agua de Thornthwaite para cada estación. Para ello, se sitúan en ordenadas la precipitación mensual en mm y la evapotranspiración mensual también en mm a una misma escala; en abcisas se colocan los meses del año. En el diagrama quedan representados, con dos curvas, los valores de exceso de agua, almacenamiento, utilización de la reserva y falta de agua en el suelo.

Para establecer la clasificación del clima según Thornthwaite, mediante la obtención de fórmulas climáticas, necesitamos definir los siguientes índices:

# FICHAS CLIMATICAS

## LA PLANTA - GUIMAR

| | E | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | Media Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temperatura (°C) | 16'2 | 16'4 | 17'4 | 17'9 | 18'4 | 20'1 | 22'2 | 22'7 | 22'8 | 21'2 | 19'3 | 17'2 | 19'3 |
| E.T.P. (mm.) | 44'9 | 40'4 | 58'8 | 64'7 | 74'2 | 91'2 | 110'8 | 111'0 | 101'1 | 83'7 | 63'5 | 50'1 | 894'4 |
| Precipitación (mm.) | 33'2 | 18'8 | 12'4 | 38'6 | 0'7 | 2'2 | 0'3 | 0'2 | 4'7 | 19'5 | 17'6 | 19'1 | 167'3 |
| Var. de Reserva (mm.) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Reserva (mm.) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| E.V.T. (mm.) | 33'2 | 18'8 | 12'4 | 38'6 | 0'7 | 2'2 | 0'3 | 0'2 | 4'7 | 19'5 | 17'6 | 19'1 | 167'3 |
| Falta de Agua (mm.) | 11'7 | 21'6 | 46'4 | 26'1 | 73'5 | 89'0 | 110'5 | 110'8 | 96'4 | 64'2 | 45'9 | 31'0 | 727'1 |
| Exceso de Agua (mm.) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Desagüe (mm.) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

## EL ESCOBONAL

| | E | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | Media Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temperatura (°C) | 14'4 | 14'6 | 15'7 | 16'3 | 17'1 | 19'1 | 21'5 | 22'0 | 21'5 | 19'6 | 17'5 | 15'3 | 17'9 |
| E.T.P. (mm.) | 39'8 | 35'9 | 52'9 | 58'9 | 69'7 | 88'5 | 108'1 | 108'0 | 93'4 | 75'7 | 56'4 | 44'1 | 831'4 |
| Precipitación (mm.) | 53'5 | 53'0 | 21'1 | 22'9 | 7'9 | 2'1 | 0'9 | 1'0 | 10'9 | 42'6 | 54'8 | 40'7 | 311'4 |
| Var. de Reserva (mm.) | 13'7 | 17'1 | -30'8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Reserva (mm.) | 13'7 | 30'8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| E.V.T. (mm.) | 39'8 | 35'9 | 51'9 | 22'9 | 7'9 | 2'1 | 0'9 | 1'0 | 10'9 | 42'6 | 54'8 | 40'7 | 311'4 |
| Falta de Agua (mm.) | 0 | 0 | 1'0 | 36'0 | 61'8 | 86'4 | 107'2 | 107'0 | 82'5 | 33'1 | 1'6 | 3'4 | 520'0 |
| Exceso de Agua (mm.) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Desagüe (mm.) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

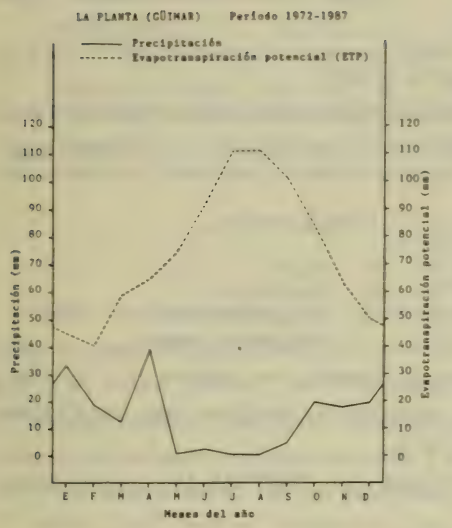
## LOMO CUCHILLOS

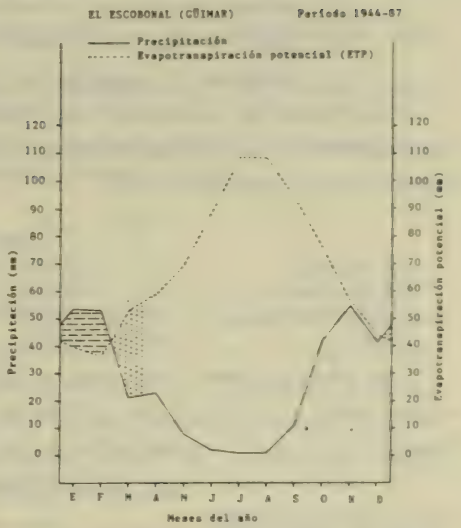
| | E | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | Media Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temperatura (°C) | 7'2 | 7'6 | 8'7 | 9'6 | 11'9 | 15'3 | 18'9 | 19'0 | 16'2 | 13'0 | 10'2 | 7'7 | 12'1 |
| E.T.P. (mm.) | 24'2 | 22'8 | 34'7 | 40'8 | 57'8 | 81'1 | 104'7 | 100'9 | 74'7 | 54'5 | 37'0 | 26'0 | 659'2 |
| Precipitación (mm.) | 66'8 | 74'2 | 48'9 | 61'0 | 2'1 | 1'0 | 0'2 | 1'6 | 12'7 | 32'0 | 49'0 | 96'5 | 446'0 |
| Var. de Reserva (mm.) | 17'5 | 0 | 0 | 0 | -55'7 | -44'3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12'0 | 70'5 | |
| Reserva (mm.) | 100 | 100 | 100 | 100 | 44'3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12'0 | 82'5 | |
| E.V.T. (mm.) | 24'2 | 22'8 | 34'7 | 40'8 | 57'8 | 45'3 | 0'2 | 1'6 | 12'7 | 32'0 | 37'0 | 26'0 | 335'1 |
| Falta de Agua (mm.) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 35'8 | 104'5 | 99'3 | 62'0 | 22'5 | 0 | 0 | 324'1 |
| Exceso de Agua (mm.) | 25'1 | 51'4 | 14'2 | 20'2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 110'9 |
| Desagüe (mm.) | 12'5 | 31'9 | 23'0 | 21'6 | 10'8 | 5'4 | 2'7 | 1'3 | 0'6 | 0'3 | 0'1 | 0'0 | 99'0 |

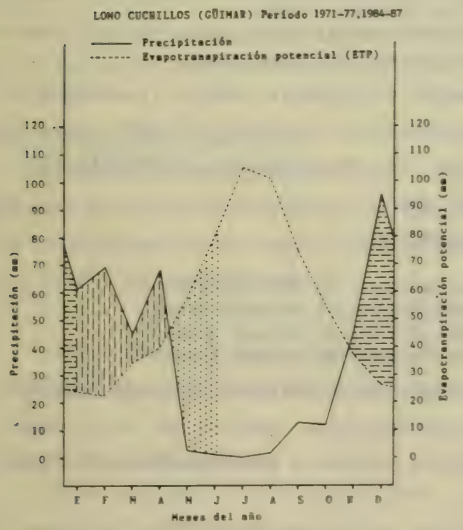
## IZARA

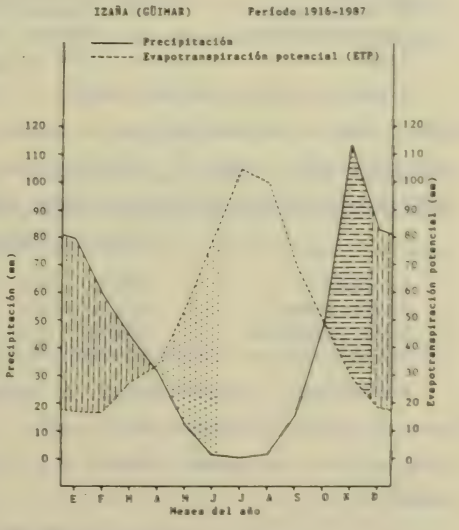
| | E | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | Media Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temperatura (°C) | 4'1 | 4'6 | 5'7 | 6'7 | 9'7 | 13'6 | 17'8 | 17'7 | 14'0 | 10'2 | 7'1 | 4'5 | 9'6 |
| E.T.P. (mm.) | 17'0 | 16'8 | 27'2 | 33'6 | 54'6 | 79'2 | 104'5 | 99'5 | 70'0 | 48'1 | 30'0 | 18'5 | 599'0 |
| Precipitación (mm.) | 79'3 | 59'2 | 44'5 | 31'1 | 12'3 | 1'3 | 0'3 | 1'7 | 15'3 | 49'2 | 113'4 | 82'3 | 489'9 |
| Var. de Reserva (mm.) | 0 | 0 | 0 | -2'5 | -42'3 | -55'2 | 0 | 0 | 0 | 1'1 | 83'4 | 15'5 | |
| Reserva (mm.) | 100 | 100 | 100 | 97'5 | 55'2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1'1 | 84'5 | 100 | |
| E.V.T. (mm.) | 17'0 | 16'8 | 27'2 | 33'6 | 54'6 | 56'5 | 0'3 | 1'7 | 15'3 | 48'1 | 30'0 | 18'5 | 319'6 |
| Falta de Agua (mm.) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22'7 | 104'2 | 97'8 | 54'7 | 0 | 0 | 0 | 279'4 |
| Exceso de Agua (mm.) | 62'3 | 42'4 | 17'3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 48'3 | 170'3 |
| Desagüe (mm.) | 43'2 | 42'8 | 30'0 | 15'0 | 7'5 | 3'7 | 1'8 | 0'9 | 0'4 | 0'2 | 0'1 | 24'1 | 169'7 |

# DIAGRAMAS DE THORNTHWAITE




Exceso de agua

Almacenamiento de agua en el suelo

Indice de humedad o exceso de agua $I_h$ = 100 s/n

Indice de aridez o falta de agua $I_a$ = 100 d/n

Indice hídrico $I_m = I_h - 0'6\ I_a$ , donde:

s = exceso de agua en el suelo

d = falta de agua en el suelo

n = necesidad de agua que es igual a la ETP.

A continuación mostramos los valores calculados para nuestra comarca, y su correspondencia en la clasificación climática de Thornthwaite, realizada según estos índices (GRANVILLE [5]):

| | $I_h$ | $I_a$ | $I_m$ | Clasificación |
|---|---|---|---|---|
| La Planta | 0 | 81'29 | -48'77 | E - Arido |
| El Escobonal | 0 | 62'54 | -37'52 | D - Semiárido |
| Lomo Cuchillos | 16'82 | 49'17 | -12'68 | $C_1$ - Subhúmedo-seco |
| Izaña | 28'43 | 46'64 | 0'45 | $C_2$ - Subhúmedo-húmedo |

Las subdivisiones climáticas se definen utilizando los índices $I_h$ o $I_a$. Para climas secos ($C_1$, D y E) se utilizaría el valor de $I_h$; mientras que para climas húmedos (A, B y $C_2$) se emplearía el valor de $I_a$.

En nuestro caso, según la clasificación dada por GRANVILLE [5], correspondería a cada estación:

La Planta ..... d - Exceso hídrico escaso o nulo
El Escobonal ..... d - Exceso hídrico escaso o nulo
Lomo Cuchillos ..... s - Exceso hídrico invernal moderado
Izaña ..... $s_2$ - Déficit hídrico estival importante

A estos índices debemos añadir el concepto de Eficacia Térmica (necesidad de agua), que se corresponde con la evapotranspiración potencial (n = ETP). Para la zona estudiada, según la clasificación que da Thornthwaite (GRANVILLE [5]), corresponderían los siguientes tipos climáticos:

| | n | Tipos climáticos |
|---|---|---|
| La Planta | 894'4 | $B'_3$ - Mesotérmico de tercer grado |
| El Escobonal | 831'4 | $B'_2$ - Mesotérmico de segundo grado |
| Lomo Cuchillos | 659'2 | $B'_1$ - Mesotérmico de primer grado |
| Izaña | 599'0 | $B'_1$ - Mesotérmico de primer grado |

Por último, el porcentaje de evapotranspiración potencial estival con respecto al valor total nos da el índice de concentración estival de la eficacia térmica, que en Agache tendría los siguientes valores y correspondencias (GRANVILLE [5]):

| | Conc.est.de ef.term. | tipo climático |
|---|---|---|
| La Planta | 35'0% | a' |
| El Escobonal | 36'6% | a' |
| Lomo Cuchillos | 43'5% | a' |
| Izaña | 47'3% | a' |

Se observa que en las distintas estaciones, como en todas las islas, dicho valor es inferior al 48%, correspondiéndole el mismo tipo climático a'.

En resumen, las fórmulas climáticas para las distintas estaciones de la comarca queda establecida de la siguiente manera:

- La Planta: E d $B'_3$ a' *Clima árido, con exceso hídrico escaso o nulo, Mesotérmico de tercer grado.*

- El Escobonal: D d $B'_2$ a' *Clima semiárido, con exceso hídrico escaso o nulo, Mesotérmico de segundo grado.*

- Lomo Cuchillos: $C_1$ s $B'_1$ a' *Clima subhúmedo-seco, con exceso hídrico invernal moderado, Mesotérmico de primer grado.*

- Izaña: $C_2$ $s_2$ $B'_1$ a' *Clima subhúmedo-húmedo, con déficit hídrico estival importante, Mesotérmico de primer grado.*

## 3. BIOCLIMA

Según RIVAS-MARTINEZ [10], la Bioclimatología es una ciencia ecológica que trata de poner de manifiesto la relación existente entre los seres vivos (Biología) y el clima (Física). Se diferencia esencialmente de la Climatología en que la informatización, índices y unidades que utiliza se intenta que estén relacionados y delimitados por las especies y biocenosis, entre las cuales las vegetales y sus comunidades, por su estatismo, son muy adecuadas.

Entre los índices numéricos que muestran una mejor correlación entre el clima y la vegetación se encuentran el índice de termicidad ($I_t$) y los índices de mediterraneidad ($I_m$) de Rivas-Martínez, el cociente ombrotérmico de Emberger y el índice de continentalidad de Gorezynski.

### 3.1. Indice de termicidad

El índice de termicidad es el valor o guarismo resultante de la suma en décimas de grado centígrado de T (temperatura media anual), m (temperatura media de las mínimas del mes más frío) y M (temperatura media de las máximas del mes más frío). Se expresa como:

$$I_t = (T + m + M) \times 10$$

Este índice se emplea para calcular los valores térmicos característicos de cada piso bioclimático y fijar sus límites.

### 3.2. Pisos bioclimáticos

RIVAS-MARTINEZ [11] entiende como pisos bioclimáticos cada uno de los tipos o espacios termoclimáticos que se suceden en una cliserie altitudinal o latitudinal. En la práctica, tales unidades bioclimáticas se conciben y delimitan en función de aquellas fitocenosis que presentan evidentes correlaciones con determinados intervalos o cesuras termoclimáticas.

Para las Islas Canarias (región Macaronésica) dicho autor propuso cinco pisos bioclimáticos, cuyos intervalos termoclimáticos fueron fijados en colabo-

ración con el Dr. Santos Guerra (RIVAS-MARTINEZ [11]), tras modificar los dados inicialmente. Dichos pisos son:

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| K. Orocanario: | T < | 6°, | m < | -1°, | M < | 4°, | It < | 90 |
| L. Supracanario: | T 6° a | 11°, | m -1° a | 2°, | M 4° a | 9°, | It 90 a | 220 |
| M. Mesocanario: | T 11° a | 15°, | m 2° a | 6°, | M 9° a | 13°, | It 220 a | 340 |
| N. Termocanario: | T 15° a | 19°, | m 6° a | 11°, | M 13° a | 18°, | It 340 a | 480 |
| O. Infracanario: | T > | 19°, | m > | 11°, | M > | 18°, | It > | 480 |

Podemos calcular el índice de termicidad para las diferentes estaciones de nuestra comarca, utilizando para las de El Escobonal y Lomo Cuchillos los gradientes reales absolutos de la temperatura media, calculados según la metodología de MARZOL [8], que sería:

La Planta: It = (19'3+12'2+20'2)10 = 517 ..... Infracanario
El Escobonal: It = (17'9+10'3+18'3)10 = 464 ..... Termocanario
Lomo Cuchillos: It = (12'1+3'9+10'5)10 = 265 ..... Mesocanario
Izaña: It = (9'6+0'8+7'4)10 = 178 ..... Supracanario

### 3.3. Horizontes bioclimáticos

Cada piso bioclimático puede subdividirse en dos horizontes o subpisos, en función de sus índices de termicidad (It). Tales unidades se designan con los adjetivos superior e inferior, que corresponden en cada piso con los niveles frío y cálido.

En la región Macaronésica (Islas Canarias), según RIVAS-MARTINEZ [11], serían:

K1. Orocanario inferior ..... It < 90
L1. Supracanario superior ..... It 91 a 150
L2. Supracanario inferior ..... It 151 a 220
M1. Mesocanario superior ..... It 221 a 280
M2. Mesocanario inferior ..... It 281 a 340
N1. Termocanario superior ..... It 341 a 410
N2. Termocanario inferior ..... It 411 a 480
O1. Infracanario superior ..... It 481 a 520
O2. Infracanrio inferior ..... It > 520

Según esta clasificación, las cuatro estaciones de la zona en estudio quedarían incluidas en los siguientes horizontes bioclimáticos:

La Planta ..... Infracanario superior
El Escobonal ..... Termocanario inferior
Lomo Cuchillos ..... Mesocanario superior
Izaña ..... Supracanario inferior

### 3.4. Tipos de invierno

Como tipo de invierno o variante invernal se designa un valor termoclimático correspondiente a un intervalo de las medias de las mínimas del mes más frío del año (m). (RIVAS-MARTINEZ [9]). Para este valor se establece la siguiente clasificación:

Extremadamente frío ..... m < -7°
Muy frío ..... -7° a -4°
Frío ..... -4° a -1°

| | |
|---|---|
| Fresco ..... | -1° a 2° |
| Templado ..... | 2° a 5° |
| Cálido ..... | 5° a 9° |
| Muy cálido ..... | 9° a 14° |
| Extremadamente cálido ..... | m > 14° |

Para Agache, en el período estudiado, se obtienen los siguientes valores de m y sus correspondientes tipos de invierno:

| | | |
|---|---|---|
| La Planta: | m = 12'2 ..... | Invierno muy cálido |
| El Escobonal: | m = 10'4 ..... | Invierno muy cálido |
| Lomo Cuchillos: | m = 3'9 ..... | Invierno templado |
| Izaña: | m = 0'8 ..... | Invierno fresco |

## 3.5. Tipos de ombroclima

En la subregión Canaria de la región Macaronésica se consideran los siguientes tipos de ombroclima, en función de los límites de los principales ecosistemas vegetales o macroseries:

| | |
|---|---|
| Arido ..... | P < 200 mm |
| Semiárido ..... | P 200 a 350 mm |
| Seco ..... | P 350 a 550 mm |
| Subhúmedo ..... | P 550 a 850 mm |
| Húmedo ..... | P > 850 mm |

En el período estudiado, las cuatro estaciones de nuestra comarca presentan los siguientes tipos de ombroclima:

| | | |
|---|---|---|
| La Planta: | P = 167'3 mm ..... | Arido |
| El Escobonal: | P = 311'4 mm ..... | Semiáridc |
| Lomo Cuchillos: | P = 446'0 mm ..... | Seco |
| Izaña: | P = 489'9 mm ..... | Seco |

## 3.6. Indices de mediterraneidad

Fueron ideados por RIVAS-MARTINEZ (1983) para tratar de expresar y separar con índices bioclimáticos los límites de la región Mediterránea con las regiones Eurosiberiana y Saharoarábiga. Estos muestran una buena correlación y permiten discriminar territorios fronterizos cuando se aplican a los meses del verano. Los tres índices de mediterraneidad estival dados por dicho autor son en esencia un cociente entre la ETP, evapotranspiración potencial (Thornthwaite), de los meses de verano, y la P, precipitación media del mismo período:

$$Im_1 = \frac{ETP\ Julio}{P\ Julio} \qquad Im_2 = \frac{ETP\ Julio + Agosto}{P\ Julio + Agosto} \qquad Im_3 = \frac{ETP\ Junio + Julio + Agosto}{P\ Junio + Julio + Agosto}$$

Si el valor del cociente ETP/P en verano es igual o menor a uno, se dice que no hay influencia climática mediterránea o mediterraneidad.

Para las estaciones de la comarca que nos ocupa, en el período estudiado, se han obtenido los siguientes valores:

| | | | |
|---|---|---|---|
| La Planta: | $Im_1$ = 369'3 | $Im_2$ = 443'6 | $Im_3$ = 115'9 |
| El Escobonal: | $Im_1$ = 120'1 | $Im_2$ = 113'7 | $Im_3$ = 76'1 |
| Lomo Cuchillos: | $Im_1$ = 523'5 | $Im_2$ = 114'2 | $Im_3$ = 102'4 |
| Izaña: | $Im_1$ = 348'3 | $Im_2$ = 102'0 | $Im_3$ = 85'8 |

### 3.7. Cociente ombrotérmico de EMBERGER

El cociente ombrotérmico de Emberger (Q) se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{100\ P}{M^2 - m^2}$$

donde: P = precipitación anual en mm

M = temperatura media de las máximas del mes más cálido

m = temperatura media de las mínimas del mes más frío

En este índice, cuanto más bajo es el cociente más árido es el clima, y cuanto más elevado, más húmedo. El índice de Emberger muestra una excelente correlación con la vegetación mediterránea y sus valores límites con la región Saharoarábiga se sitúan entre los valores 10 y 18, según sea la variante de invierno, m. (RIVAS-MARTINEZ [11]).

Por lo que respecta a la zona de estudio, en sus distintas estaciones, los valores obtenidos son:

| | |
|---|---|
| La Planta: | Q = 28'05 |
| El Escobonal: | Q = 51'95 |
| Lomo Cuchillos: | Q = 83'05 |
| Izaña: | Q = 97'76 |

### 3.8. Indice de continentalidad de GOREZYNSKI

Este índice ofrece una buena correlación con diversas series de vegetación de mayores o menores apetencias oceánicas o continentales. Se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$K = 1'7\ \frac{A}{\text{sen } L} - 20'4$$

donde: A = amplitud anual de la temperatura (diferencia entre las temperaturas medias de los meses más extremados)

sen L = es el valor del seno de la latitud en grados

Según Font Tullot (1983), los valores de K inferiores a 10 se consideran oceánicos, en tanto que los superiores a 20 se estiman ya algo continentales y los que sobrepasan 30 muy continentales (RIVAS-MARTINEZ [11]).

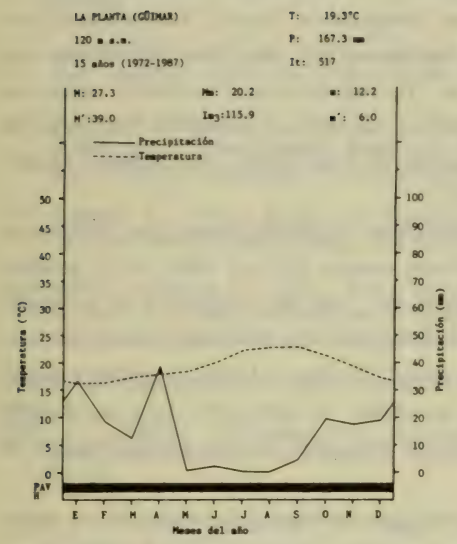
Para la Comarca de Agache los valores de K son:

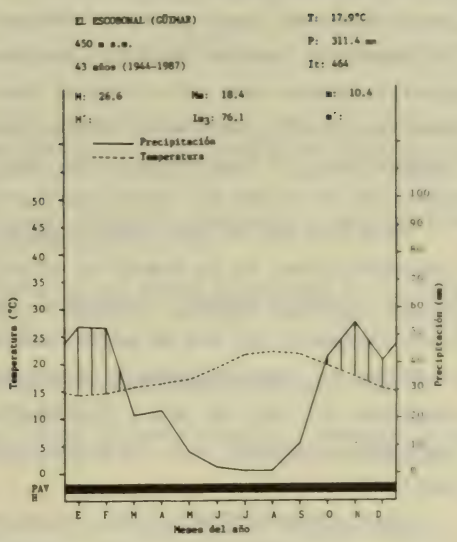
| | | |
|---|---|---|
| La Planta: | K = 3'5 ..... | Oceánico |
| El Escobonal: | K = 7'1 ..... | Oceánico |
| Lomo Cuchillos: | K = 22'3 ..... | Algo continental |
| Izaña: | K = 29'2 ..... | Continental |

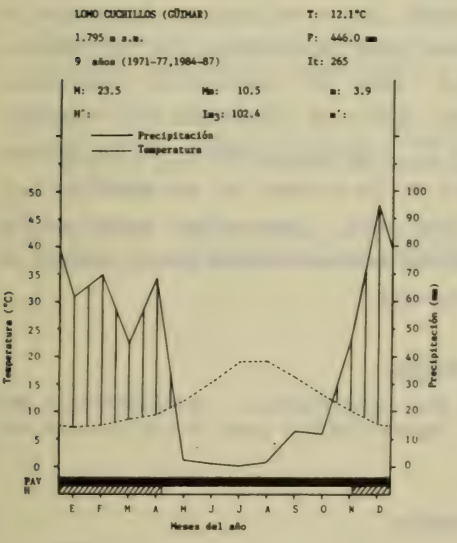
### 3.9. Diagrama ombrotérmico

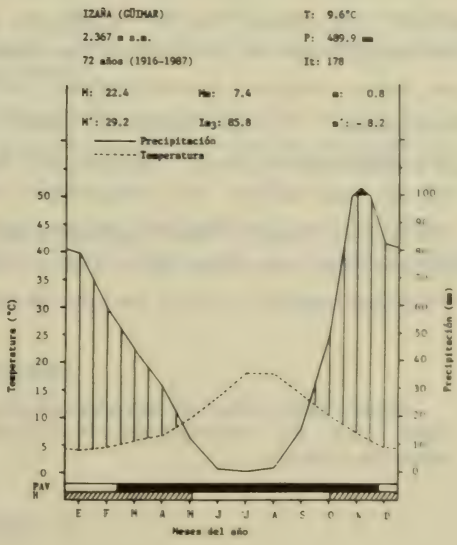
Gaussen estableció un sistema de diagramas ombrotérmicos o pluviométricos para un estudio gráfico del clima en la región Mediterránea, que luego fue universalizado por otros autores para cualquier estación del planeta (HUETZ DE LEMPS [6]). Es un sistema simple y de uso muy extendido por su valor y claridad.

# DIAGRAMAS OMBROTERMICOS




Estación húmeda

Estación seca

En estos diagramas ombrotermoclimáticos se representan en una gráfica cartesiana los valores correspondientes a T, temperaturas medias mensuales en °C, y de P, precipitaciones medias mensuales en mm, ambos en ordenadas, pero la escala de precipitaciones tiene que estar doblada con respecto a la de temperatura (P = 2T); mientras que en abcisas se colocan los meses del año. Todo mes en que las precipitaciones sean inferiores al doble de la temperatura, es decir, aquellos meses en que la curva de precipitaciones se encuentra por debajo de la curva de temperaturas, se consideran secos, apareciendo un área tanto más extensa cuanto mayor sea la aridez del clima representado.

Para cada uno de los cuatro puntos estudiados se pueden hacer las siguientes consideraciones: En La Planta la estación seca abarca todo el año; en El Escobonal la estación húmeda comienza a mediados del mes de octubre y se prolonga hasta comienzos del mes de marzo, en que se inicia la estación seca; en Lomo Cuchillos la estación húmeda se extiende desde finales del mes de octubre hasta comienzos del mes de mayo; finalmente, en Izaña la estación seca ha quedado reducida al período que va desde principios del mes de mayo hasta finales de septiembre.

Según RIVAS-MARTINEZ [10], la correspondencia de este diagrama con la vegetación es muy elevada y particularmente expresiva. Por ello hemos adoptado el criterio de este mismo autor, que ha tratado de normalizar e incorporar la máxima información posible en los diagramas, complementándolos con los siguientes datos: estación meteorológica, altitud, años de observación, temperatura media anual (T), precipitación anual (P), índice de termicidad ($I_t$), temperatura máxima absoluta del mes más cálido (M'), temperatura media de las máximas del mes más cálido (M), temperatura media de las mínimas del mes más frío (m), temperatura mínima absoluta del mes más frío (m'), temperatura media de las máximas del mes más frío (Mm), índice de mediterraneidad ($I_{m3}$), período de actividad vegetal (PAV) y período de heladas (H).


## AGRADECIMIENTOS

Quiero manifestar mi agradecimiento a don Luis Santana, ex-climatólogo del ICONA, por la información facilitada, imprescindible para la realización del presente trabajo.


## 5. BIBLIOGRAFIA


(1) BRAVO, T., 1954. *Geografía General de las Islas Canarias.* Tomo I. XVII-410 pp. Goya Ediciones. Santa Cruz de Tenerife.

(2) CEBALLOS, L., & F. ORTUÑO, 1976. *Estudio sobre la vegetación y flora forestal de las Canarias Occidentales.* (2ª ed.) 433 pp. Excmo.Cabildo Insular de Tenerife. Santa Cruz de Tenerife.

(3) DANSERAU, P., 1966. Etudes macaronésiennes.III. La zonation altitudinale. *Natur. Canad.* 93: 779-795.

(4) FONT TULLOT, I., 1959. El clima de las Islas Canarias. *An. Est. Atl.* 5: 57-103.

(5) GRANVILLE, J.J.de, 1971. Etude bioclimatique de l'Archipel des Canaries. *Cah. ORSTOM, Sér. Biol.* 15: 29-60.

(6) HUETZ DE LEMPS, A., 1969. *Le climat des Iles Canaries.* 226 pp. Societé d'Edition d'Enseignement Superior. Publications de la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines de Paris-Sorbonne. Série "Recherches". Tome 54. Paris.

(7) KAMMER, F., 1974. Klima und Vegetation auf Tenerife, besonders im Hinblick auf den Nebelniederschlag. *Scripta Geobotanica* 7: 1-78.

(8) MARZOL JAEN, M.V., 1981. Las características del clima de montaña de la Isla de Tenerife. Variaciones en el gradiente térmico. *Anuario del Departamento de Geografía*: 85-91. Universidad de La Laguna.

(9) RIVAS-MARTINEZ, S., 1983. Pisos bioclimáticos de España. *Lazaroa* 5: 33-43.

(10) -- 1987b. Introducción. Nociones sobre Fitosociología, Biogeografía y Bioclimatología. *In* PEINADO & RIVAS-MARTINEZ (ed.): *La vegetación de España.* 17-46.

(11) -- 1987a. *Memoria del Mapa de Series de Vegetación de España.* 268 pp. I.C.O.N.A. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.

(12) RODRIGUEZ DELGADO, O., 1989. *Flora y vegetación de las Bandas del Sur de Tenerife: La Comarca de Agache (Güímar).* 398 pp. Departamento de Biología Vegetal (Botánica). Universidad de La Laguna.

(13) RODRIGUEZ RODRIGUEZ, A., 1976. *Características ecológicas y morfológicas de los suelos fersialíticos de Tenerife y La Palma.* 307 pp. Tesina de Licenciatura (no publ.). Cátedra de Edafología. Facultad de Ciencias. Universidad de La Laguna.

(14) WILDPRET DE LA TORRE, W., & M.del ARCO AGUILAR. 1987. España Insular: Las Canarias. *In* PEINADO & RIVAS-MARTINEZ (ed.): *La vegetación de España*: 515-544.

SECCION

# HISTORIA Y FILOSOFIA DE LA CIENCIA

Rev.Acad.Canar.Cienc., II, 171 - 190 (1990)

# LA ELECTROQUIMICA, PRESENTE Y FUTURO (*)

**Agustín Arévalo Medina**

*Departamento de Química Física. Universidad de La Laguna*

Para un universitario que ha dedicado su actividad investigadora durante más de cuarenta años a estudios electroquímicos, en esta ocasión tan significativa de actuar como académico, es lógico que someta a juicio crítico dicha temática en cuanto permite justificar la razón de tantos años de estudio y aún más, si aún posee interés como campo de nuevas investigaciones. Por ello, he tratado de hacer una síntesis apretada que a modo de panorámica, dé a conocer los aspectos más importantes que configuran actualmente esta rama de la *QUIMICA* origen, en su día, de la *QUIMICA FISICA* y que se incluyó, hasta los sesenta, en la titulación de estas cátedras.

Resumir, de entrada, que es la *ELECTROQUIMICA*, llevaría a un análisis crítico y conceptual de las definiciones que se han venido proponiendo, lo que no me parece sea aquí oportuno, por ello, me van a permitir la aparente trivialidad de afirmar que *Electroquímica es lo que han hecho y vienen haciendo los electroquímicos.* No es una definición, por supuesto, ya que implica lo definido, pero nos introduce en el dominio de su actividad con las garantías de máxima objetividad y les deja a Vds en libertad, al hilo de la Conferencia, de concretarla como mejor prefieran.

En definitiva, habré de referirme a lo que ha sido y es el quehacer de los *electroquímicos.*

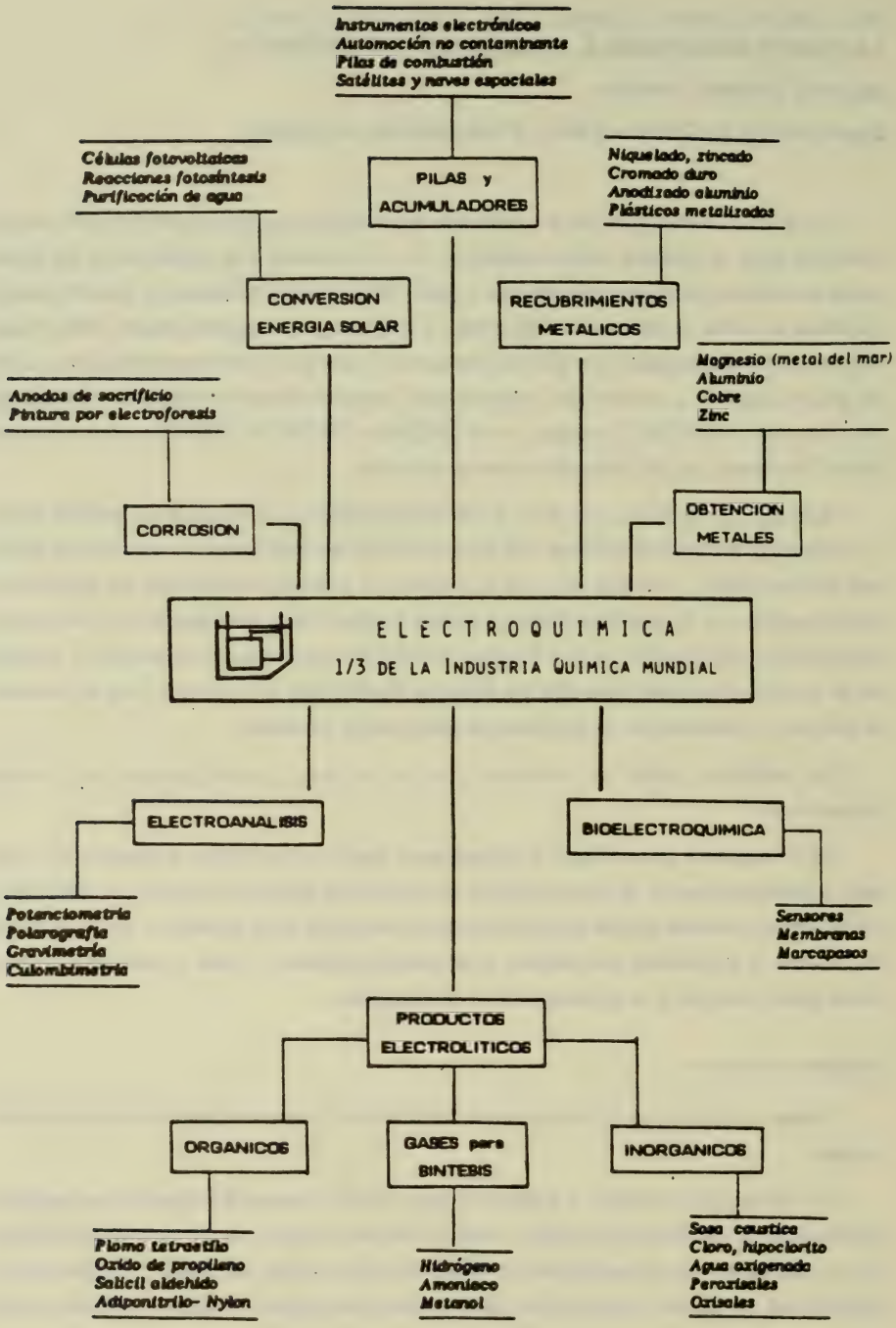
En el esquema general que acompañamos figuran, con títulos generales, las áreas más representativas de dicha actividad, de indudable impacto científico y tecnológico. Su interés es evidente ya que facilita una visión resumida de la variedad y transcendencia de la labor y problemas que ocupan a los electroquímicos. Todas y cada una de estas áreas están abiertas a la investigación y al desarrollo.

## Repaso histórico

Veamos primero por su importancia fundamental, como ocurrieron los hechos principales.

La Electroquímica nace a finales del siglo XVIII a causa del interés que suscitó la producción de electricidad animal, como la del pez torpedo, la de la anguila eléctrica y, en particular, las experiencias de GALVANI con ancas de rana. No obstante es posible que su uso se remonte más allá de estos dos siglos de aceptar que ciertos hallazgos arqueológicos, con más de 2000 años de antiguedad, encontrados en el valle de Mesopotamia: una jarra de cerámica , una barra de hierro y una lámina de cobre arro-

(*) Texto de la conferencia pronunciada en la apertura de Curso de la Academia Canaria de Ciencias (16-1-1990)


Instrumentos electrónicos
Automoción no contaminante
Pilas de combustión
Satélites y naves espaciales
PILAS y ACUMULADORES
Células fotovoltaicas
Reacciones fotosíntesis
Purificación de agua
CONVERSION ENERGIA SOLAR
Niquelado, zincado
Cromado duro
Anodizado aluminio
Plásticos metalizados
RECUBRIMIENTOS METALICOS
Anodos de sacrificio
Pintura por electroforesis
CORROSION
Magnesio (metal del mar)
Aluminio
Cobre
Zinc
OBTENCION METALES
ELECTROQUIMICA
1/3 DE LA INDUSTRIA QUIMICA MUNDIAL
ELECTROANALISIS
Potenciometría
Polarografía
Gravimetría
Culombimetría
BIOELECTROQUIMICA
Sensores
Membranas
Marcapasos
PRODUCTOS ELECTROLITICOS
ORGANICOS
Plomo tetraetilo
Oxido de propileno
Salicil aldehido
Adiponitrilo- Nylon
GASES para SINTESIS
Hidrógeno
Amoniaco
Metanol
INORGANICOS
Sosa caustica
Cloro, hipoclorito
Agua oxigenada
Peroxisales
Oxisales

llada en forma cilíndrica, fuesen, con el complemento de jugos ácidos, el dispositivo *misterioso*, que hizo posible en aquella época el recubrimiento de metales con oro o plata.

De hecho, el primer dispositivo que produjo electricidad consumiendo substancias químicas fué la pila de VOLTA al iniciarse el siglo pasado . Con ella, meses después, NICHOLSON y CARLISLE descompusieron el agua en hidrógeno y oxígeno.

La primera mitad del siglo estuvo dominada por el trabajo de DAVY y FARADAY. Aunque hicieron muchos descubrimientos fundamentales su interés se orientó asimismo a aplicaciones prácticas. Así, DAVY consiguió mediante la electrolisis el descubrimiento de los metales alcalinos y aplicó sus conocimientos electroquímicos al sugerir a la *Armada Real* inglesa como evitar la corrosión de las partes metálicas de sus navíos. FARADAY demostró que todas las formas de la electricidad eran idénticas lo que le llevó a descubrir la relación cuantitativa entre la carga eléctrica que pasa a través de una cuba o célula electrolítica y la cantidad de substancias químicas transformadas. Estableció la terminología electroquímica y explicó el fenómeno de la pasivación, tan importante en la protección de metales . Con estas pilas como fuente de corriente eléctrica, se realizaron experimentos famosos que condujeron a leyes físicas fundamentales (Ampere, Ohm, etc) y al descubrimiento por FARADAY en 1831 de las corrientes inducidas, la otra vía de que se dispone desde entonces para generar corriente eléctrica.

No mucho después, Sir George GROVE, en 1842, comprobó que la electrolísis de NICHOLSON Y CARLISLE podía invertirse, es decir , que el hidrógeno y el oxígeno pueden combinarse para formar agua, en una pila electroquímica con producción de electricidad. Fué el punto de partida de las pilas de *combustión*. En ellas un combustible , como el hidrógeno, puede ser *quemado* por vía electroquímica haciendolo reaccionar de modo continuo con oxígeno, superando así la capacidad *limitada* de las pilas del tipo de Volta. De hecho GROVE utilizó esta pila para iluminar, con lámparas incandescentes primitivas el Salón de Conferencias de la *Royal Institution* londinense.

No es pues sorprendente que mediado el siglo, el famoso físico ARAGO afirmara que la pila galvánica *es el dispositivo más extraordinario inventado por el hombre, incluido el telescopio y la máquina de vapor.*

La pila de Volta fué la precursora de las pilas o baterías primarias, como la inventada por LECLANCHE en 1867 cuyo fundamento químico -disolución de zinc en el ánodo y reducción de dióxido de manganeso en el cátodo- es el que aún persiste en las *pilas secas* actuales. Para superar el carácter irreversible de su funcionamiento, que las inutiliza al agotarse los componentes electroactivos , se buscó, como vía más económica el logro de las pilas recargables o baterías secundarias, lo que consiguió con éxito PLANTE tambien por los mismos años. Su *acumulador* de plomo-ácido se utiliza desde entonces por casi

la totalidad de vehículos a motor.

El uso de la electrolisis con sales fundidas iniciado por DAVY para la obtención de metales activos, culminó, ya avanzado el siglo , con la producción del aluminio basada en el descubrimiento independiente de HALL y HEROULT en 1886, de que la alumina puede ser electrolizada en un baño de criolita fundida.

La actividad desarrollada durante el siglo pasado pródiga en aspectos prácticos, estableció tambien claramente que lo esencial del proceso electroquímico radica en la unión del conductor metálico con otro no metálico, si bien la explicación de los fenómenos que allí ocurren progresó más lentamente.

La naturaleza de la conducción de la electricidad, considerada como la de un *fluido eléctrico* no quedó aclarada hasta muy avanzado el siglo. Las medidas de conductividad de HITTORF, KOHLRAUCH, etc. y su dependencia con la concentración y otras propiedades de las disoluciones conductoras, llevaron a Svante ARRHENIUS a enunciar en 1887 su teoría de la disociación electrolítica demostrando con ella la existencia de las especies que FARADAY denominara como *iones* (aquello que avanza). Poco después J.J. THOMSON en 1897, descubrió el electrón como partícula elemental de masa muy pequeña pero importante por su carga eléctrica negativa.

Fué entonces posible confirmar que el hecho esencial del fenómeno electroquímico consiste simplemente en un cambio en el modo de conducción de la electricidad: El flujo de electrones en el metal es reemplazado bruscamente por flujos de otras partículas de masa muy superior por lo general cargadas eléctricamente, es decir por flujos de iones del conductor no metálico.

La diferencia más importante es que en la conducción por electrones no hay movimiento neto de masa mientras que en la conducción por iones hay desplazamientos de materia de un lugar a otro del sistema. Al cambiar el mecanismo de conducción la producción o consumo de electrones por los iones va acompañada inexorablemente por la oxidación o reducción de estos iones, es decir por cambios en su naturaleza química, fenómeno localizado físicamente en la zona de contacto de ambos conductores.

Terminando el siglo Walter NERNST demostró, haciendo uso de razonamientos termodinámicos, como podía calcularse la cantidad máxima de energía eléctrica asociada a las reacciones químicas que ocurren en las pilas, si bien la verificación práctica sólo es posible cuando el flujo de corriente es prácticamente nulo, esto es, cuando la reacción electroquímica transcurre con velocidad cero. La ecuación de NERNST expresa la dependencia de la f.e.m. de equilibrio de la pila con la concentración de los componentes de la reacción y puede suministrar una amplia fuente de datos e informaciones termodinámicas relativas al proceso químico que tiene lugar en la pila. Esta

viculación entre la Electroquímica y la Termodinámica ha sido y es muy fructífera , bien entendido que dicho nexo esta basado en estados de equilibrio electroquímicos, es decir, sin paso de corriente o velocidad de reacción nula.

De hecho las reacciones electroquímicas, al igual que las reacciones químicas transcurren a velocidad finita, estando como éstas controladas por factores cinéticos además de las complicaciones especiales que aportan al proceso electroquímico, las variables eléctricas y la naturaleza heterogénea de la región de contacto anteriormente aludida.

Aunque los primeros experimentos con control del paso de corriente en sistemas electroquímicos se estudiaron en 1905 por TAFEL, el conocimiento de la cinética electródica no se ha desarrollado rápidamente. En primer lugar por la dificultad de realizar observaciones aceptables dada la naturaleza interfacial de las reacciones electródicas pues, como ya se ha indicado, el intercambio de electrones y la subsiguiente modificación de las especies químicas implicadas, se produce en una región espacial muy limitada. Aunque existían algunos estudios precursores, el realizado por GOUY ya en la primera década de nuestro siglo, mostró claramente la estructura de esta región cuyo espesor es del orden de sólo unos pocos diámetros moleculares. Esto determina que el entorno de la reacción electroquímica pueda alterarse notablemente si cambia total o parcialmente una capa monomolecular en la interfase, cambios que pueden ocurrir por la presencia imprevisible de mínimas cantidades de substancias en el sistema en estudio. Por ello la obtención de resultados correctos está condicionada a un control muy riguroso de la pureza de los componentes del sistema.

La penetración de estas ideas así como el desarrollo de técnicas más depuradas se ha producido lentamente y hasta hace muy pocas décadas no se ha dispuesto de métodos generalizados satisfactorios. Problema que por otra parte ha ocurrido tambien en otro campo estrechamente relacionado como es el de la catálisis heterogénea y más reciente, con mayor grado de complejidad, con el de la electrocatálisis.

Las primeras aportaciones experimentales en las que se cuidan los factores que garantizan el estudio de reacciones electroquímicas, parten de la escuela soviética de FRUMKIN en los años treinta. Asimismo debe mencionarse , por su importancia, la contribución de HEYROVSKY en este campo al introducir el electrodo de gotas de mercurio. La gran ventaja del mercurio frente a otros metales es la de suministrar fácilmente una superficie limpia, renovable, y atómicamente lisa. No es sorprendente por esto, que la mayor parte de los progresos que se consiguieron en la comprensión de la cinética y mecanismos de las reacciones electródicas, surgieran a partir de experimentos realizados con este electrodo.

Quedó establecido claramente que las reacciones electródicas eran reacciones químicas heterogéneas y obedecen por tanto al mismo tipo de leyes cinéticas que rigen las

reacciones químicas, es decir, la velocidad es proporcional a un producto de concentraciones de las especies reaccionantes. Sin embargo hay una característica fundamental que confiere una versatilidad única a las reacciones electródicas: la constante de proporcionalidad o *constante de velocidad de reacción* puede modificarse cambiando el potencial del electrodo. En otros términos: se dispone de una variable eléctrica sencilla que permite controlar la velocidad de estas reacciones. Además, al ser exponencial la dependencia de la constante de velocidad con el potencial del electrodo, este control puede ejercerse dentro de un rango muy amplio: En un caso extremo es posible llegar a modificar la velocidad por este medio en un factor de $10^{10}$.

Es evidente pues que el electroquímico dispone de unas posibilidades excepcionales para efectuar reacciones químicas, lo que explica el interés de la Electroquímica para obtener fácilmente productos químicos selectivos de gran contenido energético, sólo con el concurso de una instrumentación electrónica adecuada.

Sin embargo ha de tenerse en cuenta que hay un límite hasta el cual pueden ser aceleradas las reacciones electroquímicas. Esto es así por la localización interfacial del proceso electródico y la necesidad de que las especies electroactivas accedan a dicha región para que reaccionen. Por ello, si se acelera la reacción interfacial se alcanza siempre un valor a partir del cual el transporte de materia al electrodo -difusión, convección, etc- es quien determina y controla la velocidad de reacción. Este comportamiento con frecuencia *limitante* es, por otra parte, de gran interés práctico ya que la velocidad del proceso de transporte es proporcional a la concentración de las especies reactivas en la disolución. La aplicación de este principio dió origen al polarógrafo, introducido por HEYROVSKY en 1925, era el primer aparato o instrumento analítico automatizado. La ecuación de ILKOVIC que expresa la proporcionalidad de la *corriente límite* con la concentración y las características del electrodo de gotas, fué considerada por HEYROVSKY como una de las pocas leyes de la Electroquímica después de las de FARADAY.

Estos métodos electroanalíticos han ganado en precisión y sensibilidad hasta el punto de poder determinar concentraciones de partes por billón, siendo tambien aplicables a la identificación de especies electroactivas y a la forma en que están combinadas con otras substancias químicas presentes.

Hasta aquí una visión histórica de las contribuciones que han dado origen a los conceptos y fundamentos de la Electroquímica como disciplina científica a lo largo de dos siglos ya cumplidos.

Veamos ahora en comentarios resumidos, las áreas de aplicación más significativas que han surgido a lo largo de estas etapas y estimulado nuevos desarrollos tecnológicos por cuanto pueden informar sobre el quehacer de los electroquímicos.

## Recubrimientos y acabados superficiales

Es una actividad muy desarrollada en industrias de manufacturas metálicas, como la del automóvil. Aunque el objetivo principal es el decorativo y el de protección de metales frente a la corrosión, hay otros usos más específicos como el endurecimiento de partes superficiales de piezas sometidas a fuertes desgastes -caso del *cromado duro* de ejes y cigueñales-; plateado especular de superficies ,a veces de plástico, de alta reflectividad; protección de componentes microelectrónicos y obtención electrolítica de pistas metálicas para circuitos en el rango de micrometros con una precisión inalcanzable por otros procedimientos.

El gran avance sobre el conocimiento fundamental de los procesos de depósito y de disolución de metales en las últimas décadas, ha dado una base científica a la formación y crecimiento de cristales metálicos, no siempre dependientes de su naturaleza, siendo ya posible obtener recubrimientos con morfología textura y propiedades físicas bien determinadas.

Tambien recientemente, la Electroquímica ha dirigido su atención a disoluciones coloidales de polímeros orgánicos. El depósito electroforético de pinturas y revestimientos plásticos, de extraordinaria adherencia y cualidades técnicas, es otra línea abierta de gran importancia industrial.

## Productos electrolíticos y obtención de metales

La electrolisis fue la primera aplicación de las pilas y su uso como método para obtener substancias químicas, en especial elementos, ha dado lugar al desarrollo de la industria electroquímica, como complemento insustituible de la gran industria química. Estas substancias se caracterizan por su elevada tendencia a reaccionar, son productos altamente oxidantes: cloro, hipoclorito, cloratos, percloratos, peróxido de hidrógeno, numerosas persales, dióxido de manganeso, trióxido de cromo, etc., o poderosos reductores: hidrógeno, metales alcalinos (sodio principalmente) y alcalinotérreos (caso del magnesio), aluminio, zinc, etc.

De estos procesos electroquímicos la producción de cloro y sosa junto con la de aluminio, excede tanto en volumen como en valor económico a la de los restantes en varios órdenes de magnitud. Limitamos por ello los comentarios sólo a estas industrias.

Estadísticas bastante recientes, cifran la producción mundial de cloro entre 28 y 30 MM de Tm. (junto con otras tantas de sosa) lo que equivale a un consumo anual de energía eléctrica de la industria cloro-álcali de 0.1 billón de kWh. Un ejemplo significativo del impacto de la investigación electroquímica sobre la tecnología se hace patente

en la introducción de recientes modificaciones del proceso con vistas a reducir consumos energéticos y la contaminación ambiental.

La electrolisis clásica del cloruro de sodio sobre cátodos de mercurio, da origen a amalgama de sodio y cloro, amalgama que se descompone con formación de hidróxido de sodio e hidrógeno. El empleo de toneladas de mercurio constituye un problema de contaminación importante que ha sido necesario superar. El desarrollo de membranas de intercambio iónico ha abierto una nueva era en esta electrolisis ya que sin pérdida de calidad del hidróxido de sodio pueden eliminarse las *cubas de mercurio.*

Con vistas al ahorro de energía se han introducido ánodos dimensionalmente estables (DSA) de titanio en sustitución de los de grafito los cuales al consumirse durante el proceso obligan a reajustes del espacio entre los electrodos. Los ánodos de titanio además de no cambiar de tamaño, si se revisten con algún catalizador (mezclas de óxidos de titanio y rutenio o una aleación de platino-iridio) permiten realizar la electrolisis a voltajes muy bajos y con densidades de corriente mucho más elevadas. La economía es tan importante que en los últimos años se han construido en todo el mundo muchas plantas industriales de cloro introduciendo este tipo de ánodos.

Otra modificación, aún en fase de planta piloto, implica la substitución del cátodo con desprendimiento de hidrógeno por otro de membrana con consumo de aire, como se ve en la fig.1. La diferencia de potencial entre ambos permitirá un ahorro de energía del 30%.

Si bien la producción electrolítica de zinc y la de refino de cobre sobrepasan las 6 y 10 MM de Tm. anuales, respectivamente, la industria electrometalúrgica más importante es la del aluminio con una producción , sólo en EE.UU., superior a 18 MM de Tm.

Se ha dicho que el aluminio es una de las *maravillas de la naturaleza.* Aunque su afinidad por el oxígeno es muy elevada lo que le permite actuar como potente combustible, en soldaduras especiales que requieren altas temperaturas, en la propulsión de cohetes, etc., es tambien, como se sabe, un excelente material en la industria de la construcción por su gran estabilidad.

Dicha estabilidad se consigue en un proceso tambien electrolítico: el anodizado, el cual le confiere su aspecto lustroso y su gran resistencia a la corrosión.

Aún cuando es el elemento más abundante en la tierra después del oxígeno y del silicio, su tecnología se ve limitada por ahora a un solo mineral, la bauxita y pese a los 180 años transcurridos desde los experimentos de DAVY, aún está lejos de poderse considerar perfecta. La fig.2 muestra el consumo de energía en el proceso BAYER-HALL de obtención del aluminio, en función de su desarrollo desde principio de siglo.

La protección del aluminio desaparece cuando la película de óxido, formada tan

pronto entra en contacto con el aire, se elimina ya sea por la acción de álcalis o en disoluciones que contengan cloruros. En ambos casos el aluminio muestra su gran actividad electroquímica. Puede entonces ser utilizado como ánodo de sacrificio para proteger materiales metálicos de su corrosión en agua de mar, así como combustible sólido en baterías *recargables mecánicamente*. De hecho la batería aluminio-aire con electrolito salino, se considera como el generador de potencia eléctrica más idóneo, no contaminante, que jamás se había conseguido.

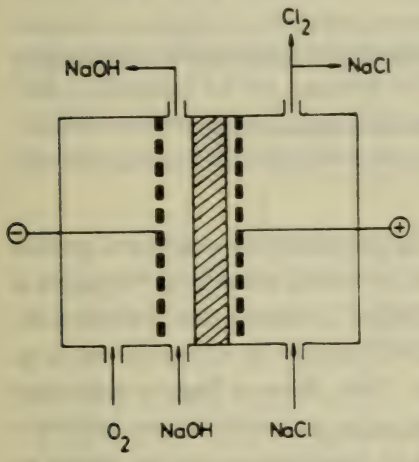



*Fig. 1.- Célula con membrana permeable al aire para producción electrolítica de cloro y álcali*

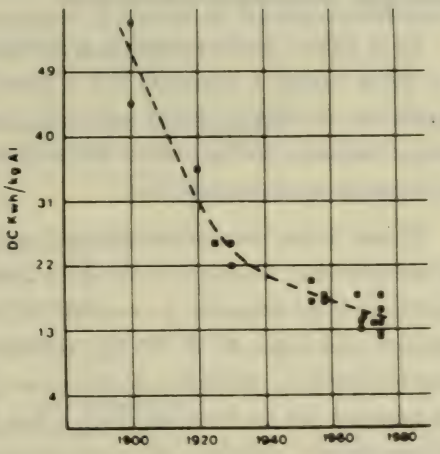



*Fig. 2.- Consumo de energía en el proceso BAYER-HALL de producción de aluminio, en función de su desarrollo.*

## Pilas y acumuladores

El desarrollo de la ingeniería, la creciente automatización de los procesos técnicos y la penetración de servicios electrónicos en todas las esferas de la economía y de la vida social se vincula necesariamente a la electrificación. Por ello la demanda de potencia eléctrica autónoma incrementa a la vez que se amplía a nuevas áreas de aplicación y su rango se extiende desde las grandes instalaciones y centrales eléctricas que han de almacenar excedentes y disponer de reservas de emergencia del orden de los megawatios, hasta los consumos de microwatios de los estimuladores de corazón.

Los sistemas electroquímicos, pilas y acumuladores, dentro de su espectro de potencia, son por ahora las fuentes más importantes de energía eléctrica, tanto por razones técnicas como económicas . No obstante la cantidad de electricidad que pueden pro-

ducir las pilas primarias está limitada por su contenido en substancias activas y la de los acumuladores por su capacidad máxima en régimen de descarga. Los generadores capaces de funcionar de modo continuo, como el de GROVE, operan con substancias reductoras o *combustibles* (hidrógeno, carbón, hidrocarburos) y con el oxígeno del aire como oxidante, de ahí que se las denomine habitualmente como *pilas de combustión*. Su desarrollo ha permitido desplazar dichos combustibles tradicionales por susbstancias más activas (hidracina, Zn, Al, etc.). Como la reposición del metal en las pilas metal-aire no se efectua de modo continuo sino periodicamente, estas pilas se consideran como secundarias *recargables mecánicamente*.

En la Tabla I puede apreciarse el notable incremento experimentado entre los años 60 y 80 en cuanto a capacidad-Wh y potencia de descarga por los generadores electroquímicos de energía. Quizás sorprenda, comparativamente, que la potencia suministrada actualmente por las baterías de automóviles, sea del mismo orden que la producida por todas las centrales eléctricas.

El reto de las baterías secundarias consiste en reemplazar los vehículos a gasolina por los eléctricos. La optimización de la densidad de energía utilizable (kWh/kg) es el objetivo de la investigación y desarrollo en este campo. La batería clásica plomo-ácido suministra del orden de 20 Wh/kg, suficiente para unidades de transporte lentas en naves industriales, terminales de aeropuerto, etc. Sería necesario llegar a multiplicar esta densidad por un factor de cinco a diez para que su aplicación alcance tambien a los automóviles . Las pilas de combustión y las de metal-aire son las que poseen en principio mayores posibilidades de futuro.

Otro aspecto que interesa comentar surge al considerar los datos que muestra la Tabla II. En ella se relacionan las substancias electroactivas de las pilas y acumuladores en orden decreciente de su abundancia o disponibilidad.

Casi todos los materiales de las pilas y acumuladores convencionales, como las de otros mejorados para fines especiales, pertenecen al tercer o cuarto Grupo. Las reservas naturales de muchos de estos materiales son, como se ve, limitadas y es de temer que pasados 30 o 40 años la demanda de alguna de dichas materias primas no pueda ser atendida. Baste decir, que la mitad de la producción mundial de plomo se destina a la fabricación de acumuladores plomo-ácido. Es urgente pues la investigación de nuevos sistemas con materiales activos más asequibles.

Fruto de este trabajo ha sido la introducción de nuevos tipos de acumuladores:

- En el Ni-Zn se ha reemplazado el óxido de plata por óxidos de niquel consiguiendo mayor economía y una densidad de energía superior en un cien por cien al del acumulador plomo-ácido.

- En el S-Na, con substancias del primer Grupo, se substituyen los electrolitos acuosos habituales (ácidos, álcalis, etc.) por una variedad de alúmina fundida. El rendimiento es alto si bien ha de operarse a 350°C.

- El mayor éxito se ha conseguido con pilas primarias de litio, metal de gran densidad de energía, en conjunción con electrolitos en disolventes orgánicos o inorgánicos poco volátiles.

Finalmente, para destacar la importancia de este apartado, una cita: El Prof. BAGOTSKY, de la Academia de Ciencias de la URSS, invitaba en una ocasión a su auditorio a imaginar la situación que se produciría si dejasen de funcionar súbitamente todas las pilas y generadores electroquímicos de corriente.

*Tabla I.- Dominios de aplicación de generadores electroquímicos*

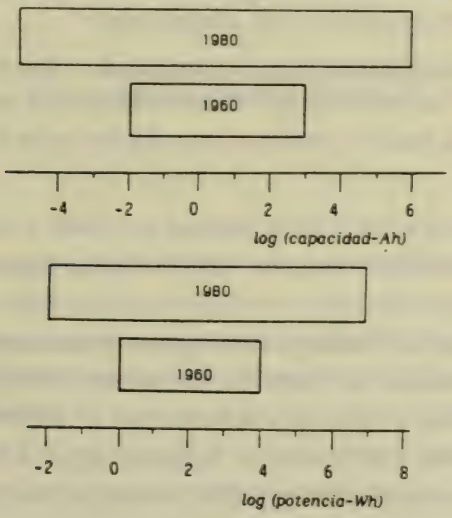



*Tabla II.- Materiales activos para pilas primarias, acumuladores y pilas de "combustión" en orden decreciente de su disponibilidad*

| GRUPO | POLO POSITIVO | POLO NEGATIVO |
|---|---|---|
| I | $O_2$, $H_2O_2$, $Cl_2$, S, FeS, $FeS_2$ | $H_2$, $NH_3$, Fe, Na |
| II | $Br_2$, $MnO_2$, $CF_x$ | Al, Zn, alcoholes |
| III | NiOOH, $PbO_2$, CuCl, $I_2$, $CaCrO_4$ | Mg, Li, Pb |
| IV | AgO, HgO | Cd |

## Conversión de la energía solar. Fotoquímica

De los muchos problemas que afronta la humanidad, la disponibilidad y distribución de la energía ha adquirido carácter prioritario.

El agotamiento de los combustibles fósiles fuerza ya al empleo de otras fuentes energéticas alternativas. Es de esperar que aún antes de que se agote el gas natural, el petróleo y el carbón dejarán de emplearse como combustibles a causa de su alto valor en la síntesis de productos químicos necesarios: plásticos, fibras, medicamentos, etc.

De qué fuentes de energía se dispondrá en el futuro?:

Las únicas conocidas con posibilidad de hacer una contribución significativa, son la fisión nuclear, la fusión o síntesis de núcleos y la energía solar en sus variadas formas.

La fisión nuclear también se apoya en recursos limitados y, lo que es peor, presenta riesgos significativos que impedirán su uso generalizado.

La fusión de núcleos ligeros no ha pasado todavía de la fase experimental y, aletargadas las esperanzas de la *fusión fría* por vía electroquímica, su utilización como fuente de energía limpia ha de implicar problemas muy difíciles tanto de materiales como de ingeniería.

La energía solar, sea a través de la biomasa, del viento u otros dispositivos para la producción de calor, electricidad o productos químicos, parece ser la mejor opción a plazo largo.

La generalización de una tecnología solar depende primariamente de la construcción de sistemas baratos, basados en materiales que puedan utilizarse cubriendo grandes áreas. Los sistemas más efectivos para la producción de electricidad o de productos químicos utilizables como combustibles (el hidrógeno p.ej.) a partir de la radiación solar, están basados en las *pilas fotoelectroquímicas* con materiales semiconductores.

Los fundamentos teóricos del uso de semiconductores como electrodos para estas pilas se han desarrollado en las dos últimas décadas y se han descrito ya muchos sistemas capaces de producir reacciones químicas de interés.

Las células fotoelectroquímicas pueden transformar la energía radiada por el Sol en energía química, generando productos de gran contenido energético, y en electricidad. Las reacciones químicas se producen en las interfases y la corriente es transportada como en la mayoría de las pilas electroquímicas. Concretamente, al irradiar con luz ultravioleta un cristal de $TiO_2$ tipo-n, inmerso en una disolución, se produce un desprendimiento de oxígeno por oxidación del agua.

La actividad en el diseño de estos sistemas es incesante tratando de conseguir nuevas

estructuras con materiales más económicos: partículas semiconductoras en suspensión revestidas parcialmente con Pt (Fig.3), sistemas químicos integrados, síntesis químicas con técnicas no familiares, uso de capas de polímeros, etc.

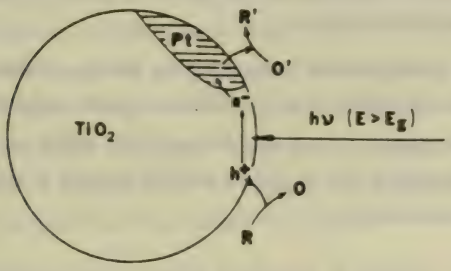



*Fig. 3.- Esquema de una reacción fotocatalítica sobre una partícula semiconductora platinada.*

He aquí un resumen de áreas de trabajo que justifica ampliamente estos esfuerzos: a) Producción de combustible. El más simple de todos, el $H_2$, por descomposición del agua, utilizable como gas natural o, en pilas de *combustión* para producir electricidad. Otros son el formaldehido y el metanol por reducción del $CO_2$, ambos son combustibles líquidos de fácil transporte.

b) Cloro a partir del agua del mar. Constituye una alternativa a la industria electrolítica cloro-álcali con sus grandes células y elevado consumo de energía eléctrica. Cabe pensar pues en pequeñas unidades generadoras de cloro *in situ* para operaciones de blanqueo, desinfección, etc.

c) Fotofertilización a partir del nitrógeno. Aunque el rendimiento es por ahora bajo, se ha comprobado la reducción del nitrógeno a $NH_3$ por semiconductores, es una reacción de enorme importancia dado que la síntesis industrial del amoniaco se realiza con el concurso de altas temperaturas y presiones elevadas. Si se consiguiera un sistema semiconductor de bajo costo podría utilizarse directamente como fotofertilizante ($N_2$-$NH_3$) actuando como las bacterias fijadoras de nitrógeno.

d) Nuevas reacciones de fotosíntesis y fotocatalíticas. Se han conseguido productos químicos como el $H_2O_2$ y diversos compuestos orgánicos por lo que no está muy lejos el

logro de producir aminoácidos y proteínas con sistemas fotosintéticos artificiales.

Las células fotoelectroquímicas han abierto un área de investigación de extraordinario interés. Es necesario pues:

Estudiar nuevos materiales semiconductores ( hasta ahora se han ensayado muy pocos: Si, GaAs, $TiO_2$, CdS, etc.).

Fomentar los estudios teóricos, para predecir sus propiedades energéticas y superficiales y su estabilidad a la irradiación.

Descubrir nuevos catalizadores distintos a los metales nobles. Es posible puedan obtenerse catalizadores homogéneos en disolución o unidos superficialmente al semiconductor. Los compuestos *cluster* de metales de transición están ampliando el conocimiento sobre este tipo de catálisis por lo que es posible lleguen a actuar como mediadores en síntesis fotoelectroquímicas.

### Electroquímica y medio ambiente

Uno de los temas más comflictivos que plantea a la humanidad la actual evolución industrial y técnica, es la alteración del medio ambiente y de las condiciones para el adecuado equilibrio ecológico de la vida.

El origen y naturaleza de la polución de la biosfera es muy variado: Las centrales térmicas lanzan cenizas y óxidos de azufre; el tráfico en las grandes urbes produce monóxido de carbono en cantidades alarmantes, óxidos de nitrógeno y residuos de combustión incompleta (entre ellos compuestos de plomo); las industrias con sus residuos y vertidos y la agricultura con el amplio espectro de pecticidas, fertilizantes, etc, contribuyen tambien, en gran escala, a la contaminación atmosférica así como de las aguas naturales.

Es un imperativo vital mantener el CONTROL de dicha polución y estudiar los medios para limitarla y llegar, en la medida que sea posible, a su ELIMINACION. La importancia del problema requiere el concurso activo de muchas ramas de la ciencia: Medicina, Biología, Física, Química y tambien de la Electroquímica.

En orden a su CONTROL, los métodos electroquímicos son especialmente adecuados para el análisis cualitativo y cuantitativo de la mayoria de los contaminantes, aún a concentraciones muy bajas. Prácticamente todos los métodos conocidos: polarografía, voltametría ,potenciometría, etc., pueden aplicarse.

La polarografía de pulso diferencial y las voltametrías de redisolución anódica y de adsorción, pueden detectar a niveles de 10 a 100 ppb tanto iones metálicos pesados

y componentes inorgánicos como substancias orgánicas con grupos electroactivos o de carácter tensoactivo( detergentes, drogas, etc.). De ambas técnicas se hace uso en analizadores continuos para determinar gases en el aire o en disolución ($O_2$, $SO_2$, $SH_2$, CO, etc.) y como método de detección en cromatografía líquida.

La potenciometría , además de la medida de pHs y del ánalisis de gases ($O_2$,$NH_3$, óxidos, etc.), mediante *sensores* construidos con electrodos de vidrio o con membranas semipermeables, ha encontrado con los electrodos selectivos la posibilidad de determinar numerosos iones (cationes y aniones), en el rango de 1 a $10^{-6}$ M. Son medidas rápidas, cómodas y automatizables. Otros sensores en desarrollo combinan la selectividad de membranas con semiconductores para analizar gases y vapores a temperaturas elevadas.

La miniaturización de los electrodos hace posible agrupar varios de ellos en una matriz común o *mosaico* consiguiendo un analizador múltiple cuyas señales pueden registrarse con independencia en una central de control.

Por análisis conductométrico puede realizarse el control de detergentes en aguas residuales, el de fertilizantes sintéticos en aguas de riego, la estimación de la calidad de aguas potables, etc., etc..

En relación con el control de substancias tensoactivas, cuyas propiedades hidrófobas y acción liofilizante pueden afectar peligrosamente a organismos fluviales y marinos, ya que al disolverse en sus membranas las destruyen, creo interesante citar, como alusión histórica a la polarografía, que una de la aplicaciones del método, llevada a cabo por el profesor HEYROVSKY, fue la determinación de compuestos tensoactivos en el agua de abastecimiento de Praga.

Entre los contaminantes orgánicos destacan los de actividad cancerígena. Como dato informativo baste señalar que un 70% de ellos pueden determinarse en alimentos, bebidas, etc., con las técnicas electroquímicas citadas.

Los métodos electroquímicos vienen tambien aplicándose -y se aplicarán más en el futuro- a la ELIMINACION de contaminantes y a la recuperación de residuos. Me limito a un simple esquema de estas actividades:

a) Separación y recuperación por vía electrolítica, de metales en aguas de vertidos y líquidos residuales de industrias químicas. Contaminantes como Cd, Pb, Cu, Ni, Cr, etc., de plantas metalúrgicas deben eliminarse necesariamente por su toxicidad.

b) Descomposición y eliminación por vía electroquímica de compuestos orgánicos indeseables: fenoles, cianuros, sulfuros,etc..

c) Tratamiento de aguas residuales de redes urbanas. La adición de electrolitos o simplemente de agua de mar permite, por electrolisis, la formación de cloro en el ánodo

y la precipitación en el cátodo de hidróxido de magnesio de gran poder floculante.

d) Eliminación de fosfatos en aguas de ríos y lagos y de productos coloidales y en suspensión en residuos de industrias de alimentación, celulósicas, petroquímicas, etc. La celulosa puede convertirse por electrolisis en $CO_2$ y éste en metanol o en formaldehido, material de partida este último para la producción de proteinas.

e) Separación de partículas coloidales e incluso de bacterias así como de diversos electrolitos en aguas contaminantes, por métodos electroforéticos y de electrodiálisis, respectivamente.

Es evidente pues, que los métodos electroquímicos contribuyen de modo eficaz en el control de la contaminación ambiental y en la eliminación de poluyentes que alteran el equilibrio natural. Por ello es imprescindible la Electroquímica al programar o desarrollar nuevos procesos tecnológicos si se ha de garantizar y mantener la calidad del entorno ecológico.

## Electroquímica y Ciencias Biológicas

Al referirnos al origen de la Electroquímica se hizo alusión a los experimentos de GALVANI en 1771 sobre la electricidad animal confirmados 50 años después por DUBOIS RAYMOND, al medir pasos de corriente en músculos y nervios sometidos a excitación.

El término Bioelectroquímica ha sido introducido hace poco más de quince años. Como razones para su introducción está, en primer lugar , el avance acelerado de la Biología moderna, que ha superado ya a la Física en el liderato de las Ciencias experimentales y , en segundo, el hecho objetivo de que la mayoría de los procesos biológicos tienen como fundamento fenómenos electroquímicos.

Factor común en todos los procesos biológicos es la existencia de un estado de separación de cargas (electrones o iones) que se produce como consecuencia de una reacción redox o como resultado del transporte, activo o pasivo, a través de la membrana. Esto conduce a la aparición de un potencial de membrana y a la formación de gradientes de concentración de los distintos iones entre el interior de la célula y su entorno circundante.

Además, las reacciones biológicas, como las electroquímicas, son heterogéneas y superficiales, ya que ocurren en interfases enzima/ disolución, con la enzima unida a la membrana, por lo cual la metodología desarrollada con procesos redox en electrodos de mercurio, puede aplicarse en general para conseguir información sobre la termodinámica, cinética, y mecanismos de las reacciones biológicas con compuestos nitrogenados (purinas, porfirinas). Análogamente las medidas de capacidad de la doble capa informan

sobre propiedades de adsorción de moléculas biológicamente activas (proteinas, DNA, RNA).

He aquí algunas áreas de estudio que señalan las tendencias actuales en el desarrollo de la Bioelectroqímica:

a) Termodinámica y cinética de reacciones redox de compuestos biológicos electroactivos.

b) Propiedades electroquímicas de equilibrio y de transporte en membranas.

c) Bioenergética.

d) Fenómenos mecano-eléctricos.

e) Medios electroquímicamente activos (excitables).

La Bioelectroquímica se viene ocupando tambien de la acción de campos magnéticos extracelulares, asi como del efecto de campos y corrientes eléctricas externas sobre diversos procesos fisiológicos entre los que se incluye la regeneración de tejidos.

Como campos más activos de la Bioelectroquímica analítica pueden citarse:

a) Ultramicroelectrodos implantables en tejidos neuronales y por vía intravascular o subcutánea, en orden al control automatizado, continuo, *in vivo*, de especies electroactivas (iones o metabolitos).

b) Desarrollo de electrodos selectivos y sensores con membranas conductoras de iones orgánicos y posibles alternativas a los electrodos de referencia externos.

c) Electrodos específicos con enzimas inmovilizadas y diseño de vasijas y electrodos optimizados para cada aplicación.

e) Desarrollo de una instrumentación que permita asociar la autocalibración y el control con el procesado e interpretación de la señal . Esta línea es de gran importancia con vistas a aplicaciones clínicas.

Dado que la Electroquímica es necesaria en Biología y Medicina, la aplicación eficaz de sus métodos y recursos exige que los electroquímicos adquieran una adecuada información sobre las necesidades y peculiaridades de estas Ciencias, única vía para formular y establecer modelos que se asemejen lo más posible a las unidades biológicas reales.

El camino no va a ser fácil. Es posible que los laboratorios especializados en Bioelectroquímica no pasen de una docena en todo el mundo. Tampoco las Universidades ofrecen Cursos que preparen y atraigan especialistas jóvenes a esta rama tan fascinante de la Ciencia.

Creo, por otra parte, que la contribución que haga la Electroquímica al progreso de la Biología y de la Medicina ha de tener como contrapartida una apertura de sus propios horizontes, lo que supone un magnífico estímulo para fomentar la colaboración.

## Investigación fundamental

Después de estos comentarios monográficos sobre la amplia y variada temática que ocupa la actividad electroquímica no puede dejarse de considerar la aportación que a su avance y progreso realiza la investigación fundamental y cuales son sus líneas o tendencias de desarrollo en la actualidad.

Se ha aludido ya al esfuerzo que viene dedicándose a la síntesis de nuevos semiconductores que en pequeñas partículas permitan fotoreacciones en estado coloidal, pero estos intentos están guiados por el estudio teórico de los estados electrónicos de tales partículas (el llamado *quantum size effect*). Otras investigaciones en este campo se centran tanto en los llamados semiconductores degenerados, es decir, con propiedades cuasimetálicas, de extraordinario interés en cuestiones relacionadas con la electrocatálisis, como en los semiconductores orgánicos o sea polímeros conductores electrónicos, de extraordinarias posibilidades en el futuro.

En otro campo tan importante como el de la corrosión metálica es de destacar el esfuerzo para obtener nuevas ideas sobre las causas de la pasividad y sobre la ruptura de enlaces en sólidos. Los modelos que permiten describir estos procesos se han elaborado, sobre bases atómicas y moleculares, con métodos que sólo aportan informaciones indirectas. Hasta hace poco los electroquímicos dirigían su mirada con envidia, hacia las amplias posibilidades de los métodos espectroscópicos utilizados en la investigación de procesos en fase gaseosa. Sin embargo lo que parecía un sueño irrealizable, el estudio *in situ* del proceso en la interfase electrodo-disolución, por vías espectroscópicas empieza a realizarse. Aunque, como se discutió en el reciente Instituto de Estudios Avanzados (ASI) organizado por la NATO en el Puerto de la Cruz, no es posible alcanzar la exactitud de los estudios en fase gaseosa, en casos favorables ya es posible comprobar determinadas propiedades electrónicas o estados de enlace, así como visualizar moléculas sencillas y modificaciones químicas en la superficie de los electrodos.

Otros dos métodos de reciente aplicación son la microbalanza de cristal de cuarzo piezoeléctrico y la microscopía de efecto tunel.

Con la primera pueden seguirse *in situ*, con gran precisión, cambios mínimos de masa en películas metálicas depositadas sobre las caras del cristal, al actuar como electrodos, a partir de la variación de la frecuencia de oscilación del cuarzo.

Con la segunda es posible obtener imágenes topográficas de la superficie metálica a un nivel de resolución de nanometros, las cuales completan *ex situ* el estudio controlado de electrodepósitos o electrooxidaciones, y permiten controlar modificaciones con fines específicos: facetados de planos, rugosidad, etc.

Permitanme complete estas perspectivas de futuro refiriendome a dos líneas teóricas esenciales y de plena actualidad:

La interpretación teórica de la transferencia de carga en los electrodos se ha desarrollado hasta en los menores detalles mediante modelos muy elaborados, en especial en el caso de transferencias electrónicas. Pero siguen existiendo discrepancias entre los parámetros que suministran dichas teorías y los datos accesibles por vía experimental. Es de esperar no obstante que a medida que se disponga de técnicas de medida más sutiles estas discrepancias se hagan cada vez menores. Siguen siendo tambien insuficientes nuestros conocimientos sobre reacciones de transferencia iónica en límites de fases, en las cuales el proceso determinante puede ser la pérdida de las capas de solvatación. En este campo será necesaria la colaboración estrecha entre teóricos y experimentadores y el uso, sobre todo, de experimentos en disolventes no acuosos.

Otro reto es la interpretación teórica de la doble capa, ese espacio *alucinante* en donde tiene lugar el transito de carga. Es asombroso hasta que extremo ha podido evolucionar el modelo sencillo de HELMHOLTZ en serie con una capa difusa, pero en los últimos tiempos se ha podido demostrar que debe considerarse la densidad electrónica en el metal como factor influyente. La comprensión de la doble capa requiere todavía una mejor descripción estadística del electrolito y la consideración de la naturaleza discreta de la carga en los iones. Como apoyo experimental serán necesarias medidas muy cuidadosas sobre superficies de monocristales bien definidas. Esto es válido tambien para las interfases semiconductores/electrolitos, en las que no es fácil disponer de datos sobre el papel que ejercen los estados superficiales y los defectos estructurales en la superficie.

## Consideraciones finales

Desearía como dije al comienzo que esta conferencia haya contribuido a darles a conocer el amplio campo de la actividad electroquímica y de sus numerosas posibilidades. Es interesante destacar a través de lo expuesto el carácter interdisciplinar de la Electroquímica moderna. Este carácter interdisciplinar si bien constituye un estímulo para el investigador puede ocasionar que algunos estudiantes se atemoricen a la hora de enfrentarse con tal cúmulo de conocimientos. Por ello es de gran importancia fomentar y conseguir una exposición competente de la Electroquímica, dentro de la enseñanza de

la Química Física y, en general, de las asignaturas de Química.

Me preocupa además, desde este punto de vista académico, que en los proyectos que vienen discutiendose sobre el futuro curriculum de la Licenciatura de Química no se haga mención explícita de la Electroquímica, lo que puede llevar a la conclusión de ser una materia de menor importancia, juicio totalmente desacertado que confío se reconsiderará, máxime si se tiene en cuenta la existencia de grupos y equipos de investigación electroquímica en casi todas nuestras Universidades y otros muchos Centros, con un empuje y categoría admirables.

Confío tambien que a nivel de política científica no se regateen medios y estímulos para su desarrollo. Con los métodos clásicos no se puede sobrevivir en la competencia internacional, la Electroquímica ha dejado de ser desde hace tiempo una ciencia que se puede practicar con voltímetros y amperímetros baratos, por el contrario exige una gran complicación instrumental si es que se quiere estar al tanto de los avances de las nuevas técnicas y conocimientos, disponer de ellas es la vía para abrir posibilidades de investigación.

Como punto final, vuelvo a la consideración que ha motivado esta conferencia: ¿se justifica por mi parte esta larga y exclusiva dedicación a investigaciones electroquímicas?. Creo que ha sido un gran desafío y a la vez una fuente de satisfacción trabajar en estos problemas ciertamente sugestivos, en cuanto al balance !ya es otra cosa!, en todo caso siempre queda la esperanza y consuelo del CID: *si no vencí reyes moros engendré quien los venciera.* Quede constancia aquí de mi reconocimiento a todos los miembros del Departamento de Química Física y a cuantos han pasado por él.

Rev.Acad.Canar.Cienc., II, 191 - 238 (1990)

# MATEMATICA Y BIOLOGIA

**NACERE HAYEK**

Departamento de Análisis Matemático, Univ. de La Laguna

38271. La Laguna, Canary Islands, Spain.

**ABSTRACT**

In this paper a panoramic view of the role played by Mathematics in the field of the biological sciences is given. As an illustration several important applications and models are also considered.

**RESUMEN**

En este artículo ofrecemos una visión panorámica del papel jugado por la matemática en el campo de las ciencias biológicas. Se incluyen como ilustración varias aplicaciones y modelos importantes.

*El resultado de un desarrollo matemático debe compararse siempre con la intuición propia de lo que constituye una conducta biológica razonable. Si tal confrontación revela que hay desacuerdo, habrá que tener en cuenta las posibilidades siguientes:*

*a) Se ha cometido un error en el desarrollo matemático formal.*

*b) Los supuestos iniciales son incorrectos y/o representan una simplificación por demás excesiva.*

*c) La intuición propia de lo biológico adolece de desarrollo inadecuado.*

*d) Se ha descubierto un principio penetrante.*

*Harvey J. Gold* [12]

La ciencia denominada biología ( término acuñado en 1802 por Lamarck y Treviranus ), que había estado dominada por la controversia entre los partidarios de la preexistencia de los gérmenes y los de la epigénesis, logró sacudirse definitivamente de toda apelación a consideraciones extracientíficas de orden metafísico o teológico, al adentrarse en el siglo XIX con una dedicación más particular a los problemas del desarrollo y evolución de los seres. Pudo diversificarse así en numerosas disciplinas y experimentar un notable crecimiento, del que dan buena cuenta el nacimiento de la teoría celular y disciplinas asociadas ( citología e histología ), las innumerables aportaciones al estudio morfológico, inventario, clasificación y geografía de los animales y plantas ( zoología y botánica ), la generación de la anatomía comparada, de la paleontología, de la fisiología animal y vegetal ( promovida con las investigaciones de Lavoisier ), primeros trabajos de genética ( Mendel ) y las teorías explicativas de la evolución debidas a su gigantesca figura Charles Darwin.

En todo ese proceso de gestación, el pensamiento original matemático deambuló por unos derroteros diferentes, pudiéndose decir que hizo poco en favor de la biología. Era obvio que la evolución general de ambas ciencias acusaba una bien marcada independencia la una de la otra. Mas, la desconexión, o mejor aún, la incompatibilidad entre el método analítico de la matemática y el quehacer propio de la biología ( y en general, el de las ciencias de la vida ), quedaría quebrantada a partir de los primeros lustros de este siglo XX. Y la matemática, construída hasta entonces bajo la égida de una tradición filosófica que se empecinaba en hermanarla con el dominio de lo estático e intempo-

ral, excluyendo de su actividad el conocimiento de lo que nace y muere con el tiempo ( como los seres vivientes y en particular, el hombre ), pareció entrar en un proceso de autotransformación en gran parte impulsado por los espectaculares progresos de sus ramas de estadística y cálculo de probabilidades, como consecuencia del cual sería más tarde sustituída ( ya plenamente en los últimos treinta años ) por una matemática moderna, más flexible y para el mundo real, que dejaba una estela de importantes repercusiones en campos que otrora le fueron claramente vírgenes y nada atrayentes.

Para matizar mejor el grado de esa mutación, recordemos lo que dice R. Queneau |25| al asegurar que en sus relaciones con la matemática, toda ciencia pasa por las cuatro fases siguientes: empírica ( que da cuenta de los hechos ), experimental ( que se propone medirlos ), analítica ( destinada a calcularlos ) y axiomática ( en donde se los deduce de ciertas premisas básicas acompañadas generalmente de una metaciencia ). A tenor de este criterio, conviene indicar que, en los albores de nuestro siglo, sólo la física, y en algunas zonas la química y la ingeniería, alcanzaron en su conjunto a la tercera fase, viéndose únicamente tratar con el método analítico de la matemática dominios pequeños de la biología ( teoría de la lucha por la vida ) y algunos hechos esporádicos de formulación cuantitativa. En términos generales, podemos aceptar que, desde el punto de vista matemático, no se había presentado ningún problema de auténtico interés a resolver, desligándose por ende sus seguidores de campos como la biología que no se ofrecían a su actividad, por expandirse de forma nada estimulante para la creación de nuevos pensamientos matemáticos.

Quizás lo anterior incline a pensar que la matemática no hubiera realizado intentos serios de encarar problemas biológicos. Nada más lejos de nuestro propósito. Virtualmente desde mucho antes, se apreciaban en casi todas sus áreas, vestigios de variadas incursiones matemáticas. Por ejemplo, baste reseñar que L. Euler (1707-1783) había escrito sobre el flujo de la sangre, biología de poblaciones y problemas de mortalidad; que Descartes (1598-1650) se detuvo a examinar a los animales y al cuerpo humano como mecanismos que podrían ser explicados en términos mecánicos; y asímismo, que Helmholtz (1821-1894), Volterra y otros importantes matemáticos, se ocuparon de cuestiones de fisiología, ecología y otros campos de la biología. Existieron igualmente esfuerzos en utilizar matemáticas para describir el crecimiento de poblaciones humanas, destacando en el siglo XVIII, el modelo elemental propuesto por el economista y demógrafo inglés Thomas R. Malthus (1766-1834), que se apoyaba en la hipótesis de que la tasa instantánea de crecimiento de una población era proporcional al tamaño de la misma (*). Modelos modificados del de Malthus surgieron luego también, entre otros el del sociólogo belga P.F. Verhulst (siglo XIX), prediciendo que los tamaños de las poblaciones tendían asintóticamente a un valor constante al aumentar el tiempo, y que conllevaría el trato de ecuaciones diferenciales con retardo o ecuaciones diferenciales funcionales de considerable interés matemático.

Debe señalarse, por último, que A. J. Lotka, al decidir no

---

(*) La hoy famosa conclusión de Malthus de que " la población se multiplica en una progresión geométrica, mientras que la reserva de alimento crece sólo en progresión aritmética ", preveía una lucha por la existencia en la que vió Charles Darwin un mecanismo para explicar la selección natural, lo que puso en evidencia que una idea esencialmente matemática había contribuído al desarrollo del concepto central de la evolución biológica [24].

tomar en consideración al tiempo como variable discreta, sería el primero en introducir un modelo de tiempo-continuo, lo que representó el punto de partida de ulteriores investigaciones sobre la dinámica de poblaciones |26| (*).

De la misma enumeración de los escasos hechos reflejados en esta retrospectiva ojeada, cabe bien deducir ahora lo que antes quisimos poner de manifiesto, esto es, que en realidad la matemática nunca jugó en las ciencias biológicas un papel importante y desde luego, ni por asomo cercano al que desempeñó siempre en las ciencias físicas.

Habría de ser más tarde, repetimos, cuando las cosas cambiaran sustancialmente, y justo desde el momento en que el campo de las matemáticas se viera enriquecido con el advenimiento de unas nuevas ideas que a la par de excitantes, resultaron ser a la postre, verdaderamente revolucionarias. En efecto, esas concepciones que en principio se acogieron como productos mas o menos interesantes de la inspiración matemática, produjeron bien pronto un reconocido impacto en zonas que hasta allí le fueron vedadas, del trabajo intelectual.

La multivalencia y pluriadaptación de que venía provisto el bagaje de esa nueva matemática que posteriormente se ha dado en llamar moderna, posibilitó ciertamente una sensible e inesperada infiltración en áreas impensables como la medicina y la bioquí-

(*) A raíz de esto se abre una larga historia de modelación matemática. En las décadas de los 1920 y 1930 hubieron verdaderamente grandes adelantos con los trabajos de Lotka y de Volterra en ecología, e igualmente con los de Fisher, Haldane y Wright en genética (de ello hablaremos más adelante) y en años más recientes, técnicas matemáticas mucho más sofisticadas se han entroncado con cuestiones de biología de poblaciones, simultaneándose con avances en trabajos experimentales y de campo, gestadores de una nada desdeñable riqueza de nuevos datos.

mica, ó en la planificación industrial, sociología y filosofía, revelándose incluso provechosa la formulación matemática de los problemas, hasta para los docentes en historia, geografía y lingüística. Pero muy en particular, y por lo que atañe al presente trabajo, se hicieron más visibles diversas situaciones en biología en las que los modelos matemáticos canalizaron resultados tan prometedores que privaría la necesidad de emplearlos.

Conviene, no obstante, hacer una pausa a este respecto, para aclarar que las cosas no evolucionaron con la ligereza que se presumía. En primer lugar, los tratamientos iniciales siguieron el camino de la metodología básica de la física matemática. Espoleados aún por la máxima de Galileo " mide lo que puede ser medido y haz mensurable lo que aún no lo es ", los biólogos comenzaron a investigar principios cuantitativos que pudieran representar propiedades fundamentales del fenómeno que observaban, con el fin de añadir a aquellos principios , proposiciones y axiomas matemáticos que tendieran a suministrar nuevas informaciones sobre el fenómeno. Paulatinamente, se fué haciendo así cada vez más patente, que gran número de cuestiones relativas a los animales o a los seres humanos, conllevaban problemas " matematizables "; y que el hallazgo de un adecuado modelo matemático acrecentaba enormemente la explicación del funcionamiento normal o patológico de un órgano, desde el momento en que se supieran formular ciertas leyes o postulados básicos. Sin embargo, fué igualmente perceptible que la determinación de estos modelos era mucho más difícil que en el caso de los fenómenos físicos, debido a que su acoplamiento con los datos experimentales resultaba bastante más delicado por la mayor complejidad de los procesos de la biología.

El hecho mismo de que sólo unos pocos problemas biológicos hubiesen llegado a posibilitar unas descripciones matemáticas lo suficientemente satisfactorias para que su manipulación cristalizara en un estudio productivo e interesante, tenía una lógica explicación. Históricamente, y según antepusimos, el desarrollo de la biología fué en todo tiempo manifiestamente distinto del de la física en cuanto a su correlación con la matemática. Mientras a los físicos se les brindaba la posibilidad de extraer del mundo real sistemas sencillos, de emplear condiciones experimentales simplificadas y de usar una instrumentación precisa para la ejecución de medidas asentadoras de unas leyes básicas de descripción de los sucesos de la naturaleza, los biólogos tuvieron que encararse desde un principio con sistemas o procesos intrínsecamente complejos; más concretamente, los objetos sobre los cuales éstos se vieron obligados a efectuar sus investigaciones, hallábanse compuestos de una enmarañada amalgama de partes diferentes, que interactuaban las unas en las otras, y con el agravante de ser en extremo numerosos y en general afectados de inevitables y grandes errores, los datos experimentales medidos sobre los mismos. Habría que decir aquí, que únicamente el uso de métodos estadísticos y probabilísticos que ya los matemáticos habían desarrollado para la estimación de determinados errores en astronomía, consiguió proporcionar algunos útiles conocimientos en las investigaciones que se afrontaron.

Con todo, y aún siendo harto conocido que la modelización matemática de los sistemas representaba un paso esencial en el conocimiento científico de los mismos ( y previsiblemente un idóneo medio a través del cual se dedujera su futuro e ignoto comportamiento ), la aludida complejidad extrema de la mayoría de

los sistemas biológicos siguió disuadiendo durante bastante tiempo la extensión a los mismos de esa técnica metodológica.

Ahora bien, ¿ qué ha sucedido en los recientes años ? ¿ cuáles fueron las causas que modificaron hasta tal punto el panorama científico para que la matemática pudiera contactar tan estrechamente con la biología y otros campos afines que desde siempre le fueron de difícil aplicación ?

Esas causas no son difíciles de adivinar. A aquella matemática renovada, a aquellas nuevas concepciones a las que antes nos referimos, no tardó en unirse la quizás más sorprendente aplicación de dicha ciencia en el presente siglo: el computador electrónico. Y decimos aplicación *matemática*, apresurándonos a precisar que fué la matemática la que no sólo intervino fundamentalmente en las ideas centrales de su invención (*) sino, y lo que es más importante, la que tuvo que permanecer ineludiblemente presente en el esclarecimiento mismo de cuantas limitaciones y problemas habría de llevar luego consigo su uso cotidiano. La rapidez de ejecución de los miles de millones de operaciones necesarias que para el trato de los fenómenos más arduos y complejos brinda el computador, consiguió ciertamente anudar de modo considerable los lazos de colaboración entre los matemáticos

---

(*) El computador electrónico culmina un proceso matemático que en el transcurso de los siglos fué suministrando sucesivamente diversos utensilios para la resolución y aceleración de los cálculos, como el ábaco, los logaritmos, la regla de cálculo y la calculadora mecánica, y que acaba en una máquina universal con una multiplicidad creciente de usos potenciales, cuya noción provino ni más ni menos que de la lógica matemática abstracta. Para quienes pudieran pensar que el computador es una simple revolución de la ingeniería, habría que recordarles que la matemática subyacede modo reinante en el corazón mismo de la computación y en cualesquiera impulso y desarrollo de aquél.

y físicos, y los biólogos y demás científicos de la vida (*). Claro está que, juntamente con los aumentos en velocidad aritmética, vinieron también incrementos en capacidad de memoria, en velocidad de acceso a las instrucciones almacenadas y una considerable proliferación de usos potenciales.

Dependió en gran medida del computador el éxito de buen número de modelos matemáticos aparecidos en dinámica de poblaciones, ecología, etc... a finales de la primera mitad del presente siglo, y desde entonces ha sido participante activo en el desarrollo de las diversas teorías científicas.

El ordenador actual, con su poder de resolución y versatilidad gráfica cada vez más perfeccionada, se ha convertido en un poderoso auxiliar que sirve para contrastar teorías, hipótesis y conjeturas, suministrando al propio tiempo valiosas pistas capaces de iluminar el camino a explorar. Su papel como instrumento de investigación en los modelos biológicos se entiende rápidamente, porque el recurso a la simulación mediante computador consigue dar una buena imagen global de su comportamiento dinámico. El proceso presupone naturalmente una discretización de aquéllos, lo que hace lógico que muchas veces se arranque de modelos discretos en ecuaciones en diferencias, que ofrecen la gran ventaja de explicitar la estructura del modelo en cuestión, sin echar mano a conceptos matemáticos especializados. Además, al poseer las ecuaciones siempre solución, cabe computarla directamente, pu-

---

(*) Si nos situamos, por ejemplo, en el campo de la cristalografía de los rayos X, piénsese que en la determinación de la estructura de las moléculas gigantes de las proteínas ( uno de los éxitos más brillantes de la ciencia contemporánea ), el análisis de los datos cristalográficos requería tal monstruoso porcentaje de poder calculatorio que sólo un computador de gran velocidad podía ser capaz de dar.

diéndose, por otra parte, introducir el modelo en el computador sin elaboración previa; y quedando reflejado, por último, con bastante aproximación, el comportamiento cualitativo del sistema.

La penetración de la matemática en los procesos biológicos gestó los fundamentos de una nueva ciencia, la *biomatemática*, la cual se ha ido desarrollando cada vez con mayor pujanza. Hoy nadie ignora que en los últimos cincuenta años muchos problemas de la biología moderna se han visto claramente beneficiados de un tratamiento matemático, lo que ha originado que, en justa reciprocidad, gran número de matemáticos empezaran a fascinarse por las ciencias de la vida.

En términos estrictos, la biomatemática asume el formalismo y la metodología propios de la matemática en la formulación y el análisis de teorías inherentes a la biología ( y en general, de las ciencias de la vida ).

Nacida entre los bastidores de la biofísica, la biomatemática es difícilmente distinguible de aquélla hasta 1925 en que el matemático italiano Vito Volterra de la Universidad de Roma, inicia una serie de investigaciones demandadas por el biólogo d'Ancona de la Universidad de Siena, quien preguntaba a aquél si era factible hallar alguna vía matemática para el estudio de las variaciones en la composición de determinadas asociaciones biológicas. El estudio quedó fundamentado sobre las integrales de ciertas ecuaciones diferenciales e íntegrodiferenciales, que fué necesario examinar con detalle, tanto cuantitativa como cualitativamente.

Del diálogo fructífero d'Ancona - Volterra sobrevino una memoria notable que el segundo publica en 1931 |37|, y que significó el primer escalón en el desarrollo de la biomatemática.

En la formulación de los modelos que han venido siendo empleados desde entonces, interviene un buen número de técnicas matemáticas, si bien no son muchas las áreas más frecuentemente utilizadas (*). En base a encuestas realizadas en Congresos de Biomatemática ó de lo que se desprende de notables colecciones especializadas como las *Lectures Notes in Biomathematics* de la Editorial Springer Verlag o *Lectures of Mathematics in the Life Sciences* de la American Mathematical Society, hoy puede afirmarse que en más del setenta por ciento de los casos, los modelos biológicos que se estudian están mayormente expresados matemáticamente en términos de ecuaciones de evolución ( en general, ecuaciones diferenciales ordinarias, ecuaciones de argumento retardado, ecuaciones integrales o íntegrodiferenciales, ecuaciones de reacción-difusión ); sólo en un quince o veinte por ciento de casos, los modelos consideran efectos estocásticos o vienen formulados como procesos estocásticos.

En la actualidad, la biomatemática ha experimentado un extraordinario crecimiento en todos sus campos. De sus principales repercusiones en el ámbito biológico, extraemos seguidamente varios contextos que acreditan su importancia, deteniéndonos expresamente en algunos de ellos y dejando para el final del presente trabajo una concisa ilustración sobre algunas recientes teorías, como la de las catástrofes y la de la bifurcación, así como algunas consideraciones sobre el caos y sus connotaciones en el desarrollo de la biología en estos últimos años.

---

(*) Hasta hace sólo unas decenas de años, era generalmente asumido que la única rama de la matemática necesaria para un biólogo, era la estadística. Durante mucho tiempo fué ignorado que para describir muchos procesos biológicos, el conocimiento de otras ramas de la matemática, como las de ecuaciones diferenciales y teoría de la probabilidad, ofrecía a los biólogos posiciones más ventajosas.

Comencemos diciendo que en la biología cuantitativa existen, según es bien sabido, varios tópicos cuyo desarrollo requiere técnicas totalmente diferentes de las usadas en la física y química clásicas. La existencia de gran número de especies sumamente variables en cuanto a tamaño y apariencia, hizo indispensable la creación de una teoría de distribución de medición de caracteres, de sus promedios y variabilidades, dando lugar a la introducción de varios conceptos de gran utilidad. Así, por ejemplo, la afinidad entre parientes íntimos, tales como hermanos y hermanas, condujo a medidas de semejanza, entre ellas los coeficientes de regresión y correlación.

Anotemos también que en algunos campos biológicos se ha requerido para su necesaria evolución, el manejo de ecuaciones no lineales de difusión de un tipo no standard, por ejemplo, el de la ultracentrifugación. Que en otros, como el de la cristalografía de los rayos X, ha sido esencial la manipulación de series matemáticas complejas de Fourier. Y que la teoría de nudos de la geometría, está sirviendo actualmente a los biólogos para estudiar las formas de anudación del DNA ( ácido desoxirribonucleico ) de la célula viviente.

Otro hecho notable es que para construir una teoría de la autorreproducción, se han venido aplicando métodos matemáticos al estudio de un proceso que ha parecido siempre exclusivamente biológico, muy en especial desde que el célebre matemático John von Neumann ideara en los años cincuenta máquinas autorreproductoras. Von Neumann, considerado como el más universal hombre de ciencia del siglo XX, abogó siempre para que el matemático profesional no perdiera de vista la conexión con los problemas reales del mundo

físico, llegando a alucinar a un auditorio en una célebre conferencia pronunciada en 1948 titulada " La teoría general y lógica de los autómatas ", en la que propuso la construcción de máquinas que tuvieran la misma capacidad de reproducción que los organismos vivos mostrando una nueva visión de la manera en que se reproducen los seres vivientes. Sus ideas llevaron nada menos que al descubrimiento en 1953 por los biólogos Francis Crick y James D. Watson, de las sustancias DNA y RNA (ácido ribonucleico) que componen la célula viviente (*).

En el análisis biológico de las poblaciones se presentan cuestiones complicadas que muchas veces son resueltas aplicando conceptos matemáticos simples. Lo que se investiga principalmente es el cómputo, estimación y predicción de medidas y tamaños, figurando entre sus problemas comunes el de la distribución geográfica de genes, el de la distribución de edad en poblaciones, el de variaciones en grupos de individuos en el interior de una especie, etc... Merecen destacarse los interesantes modelos debidos a A. J. Lotka (1880-1949) y A. G. McKendrick, quienes dedujeron el modo de predecir una estructura de edad en las poblaciones humanas.

Hay que remontarse a la época del físico belga Adolphe Quetelet (1796-1874) para señalarle como el primero en dedicarse a estudiar estadísticamente las variaciones de altura en un conjunto de individuos de la especie humana, obteniendo una representación de estas variaciones mediante una curva denominada " polígono de

(*) La molécula DNA (portadora de toda la información genética celular), pasa instrucciones para que el RNA constituya las proteínas, y mientras éste las forma, aquélla programa sus genes (decidiendo, por ejemplo, altura, temperamento, etc.. en el caso de un niño humano), cuadro ciertamente familiar para un diseñador de computadores.

frecuencias ". Más tarde, Francis Galton (1822-1911), impulsado por la obra fundamental de Darwin *Sobre el origen de las especies mediante la selección natural (Londres, 1859)*, aplica métodos estadísticos a la biología, creando la *Biometría* como teoría estadística de la variación individual.

Precisamente, algunos notables trabajos referidos esencialmente a la Biometría y al estudio de cruzamientos entre variedades de una misma especie, y que curiosamente no tuvieron trascendencia en el momento de su aparición ( entre ellos, el famoso de Mendel de 1865 ), adquirieron luego inusitada significación en los albores del siglo XX, para labrar los cimientos de una importante nueva disciplina, la *Genética* ó ciencia de la herencia.

Los orígenes de la genética de poblaciones se remontan a 1908 cuando el matemático inglés G. H. Hardy (1877-1947) y el médico alemán W. Weinberg (1862-1939) descubrieron independientemente un principio relacionado con la frecuencia de genes ( alelos ) en una población. Hardy y Weinberg mostraron que se establecía un equilibrio entre las frecuencias de los alelos en una población, y cómo la frecuencia relativa de aparición de cada alelo tendía a permanecer constante, generación tras generación. Una relación matemática conocida ahora como teorema de Hardy-Weinberg fué desarrollada para describir el equilibrio de los alelos.

Hoy se sabe que en el contexto genético se torna fundamental la metodología probabilística y el enfoque bayesiano de las situaciones teóricas inspiradas en el cultivo empírico, y que con la genética biométrica, las preguntas concernientes al comportamiento de los genes en las poblaciones y a la mecánica de la evolución han logrado adquirir una nueva entidad (*).

---

(*) Obras excelentes que recogen un estudio sistemático del decir de la modelación matemática en genética de poblaciones son las del Prof. A. Jacquard ([21],[22]).

Veinte años después del " redescubrimiento " (1900) del trascendental trabajo de Mendel, tres notables científicos, R. A. Fisher (|9|), S. Wright y J. B. S. Haldane (|17|), se constituirían en verdaderos planificadores del planteamiento mendeliano en cuanto a la herencia genética. Haciendo uso de técnicas matemáticas de modelización, mostraron la posibilidad de combinar las reglas de la herencia y las leyes del azar, de forma que un gen dado sobreviva y muera en una población.

La extrema sencillez del modelo de selección considerado por Fisher - Wright - Haldane ( apoyado en la teoría de la difusión ), permitió luego aclarar algunos conceptos fundamentales, entre ellos los de *equilibrio* y *estabilidad*, que hubieron de ser considerados ante la curiosidad biológica en saber si un sistema concreto ( una población, un sistema ecológico ) en estado de equilibrio, permanecería en la proximidad de este estado cuando se presentaran pequeñas perturbaciones. El modelo despertaría, por otra parte, el interés de muchos científicos de la vida porque facilitaba una prueba matemática del llamado aumento de " adaptación " en los procesos de selección que tienen lugar en la naturaleza.

Ya hemos adelantado que diversos capítulos de la teoría de ecuaciones diferenciales ( ecuaciones en diferencias, teoría cualitativa, análisis asintótico, ... ), han venido jugando un gran papel en el estudio y comprensión de numerosos problemas biológicos.

El hecho de que los modelos tengan la forma de ecuaciones diferenciales, conlleva tres importantes implicaciones: la primera es que los modelos predicen el futuro inmediato sobre la base del *presente*, nó sobre la de alguna parte del pasado; en segundo lu-

gar, es asumido ( como en todos los modelos clásicos de física y química ), que el incremento de cualquiera de las variables internas ( o de estado ) en un intervalo corto de tiempo de longitud h es una función especial de h; y por último, los modelos son básicamente *continuos*, más bien que discretos |28| (*).

Dentro de la clase de ecuaciones diferenciales, se aprecia que las de primer orden gobiernan el crecimiento de varias especies. El modelo más simple, conocido como ley malthusiana de crecimiento de población, puede ser formulado mediante el problema de valor inicial: $\frac{d\,p(t)}{dt} = a.p(t)$ (a=cte.) , $p(t_o) = p_o$ , donde p(t) representa la población de una especie dada en el tiempo t. La solución del mismo: $p(t) = p_o.e^{a(t-t_o)}$ , traduce el hecho de que cualquier especie que satisfaga dicha ley malthusiana crece exponencialmente con el tiempo.

Hay que advertir que estos modelos lineales de crecimiento de poblaciones son idóneos siempre que la población no sea excesivamente numerosa. Para poblaciones muy grandes, el modelo no resulta tan seguro (**), por lo que conviene considerar el dado por la denominada ley *logística* de crecimiento de población:

$\frac{dp}{dt} = a\,p - b\,p^2$ (a,b = coeficientes *vitales* de la población),

---

(*) Como lenguaje descriptivo, la teoría general de las ecuaciones diferenciales posee una inherente limitación, y es la de que estas ecuaciones sólo pueden describir fenómenos en donde los cambios sean regulares y continuos. Queremos decir que, en términos matemáticos, las soluciones de una ecuación diferencial deben ser funciones diferenciables, que son las que se han de utilizar para los relativamente pocos fenómenos que presentan un comportamiento bueno y ordenado. No obstante, la imaginación matemática se ha ido esmerando en desarrollar métodos que puedan ser capaces de tratar los fenómenos divergentes y discontinuos, que son los de mayor abundancia en la naturaleza.

(**) Se ha comprobado que el modelo de Malthus se aplica satisfactoriamente a poblaciones en ciertas fases de su crecimiento, pero esto no sucede en una variedad de otros casos.

introducida en 1837 por el biólogo-matemático alemán Verhulst (*).

A menudo se observa en la naturaleza la lucha por la existencia entre dos especies similares que compiten por la supervivencia en una misma demarcación o nicho ( sistemas *depredador-presa* ) que culmina casi siempre con la completa extinción de una de las especies. Este fenómeno conocido como el *principio de exclusión competitiva*, fué enunciado ( si bien en forma ligeramente diferente ) por Darwin en 1859.

Un cuidadoso estudio desde el punto de vista matemático de este principio ecológico básico es expuesto en el cap. XVII de la obra de M. Braun |4| (**). Este autor considera un modelo deducido matemáticamente de un sistema de dos ecuaciones diferenciales que gobiernan la interacción entre dos especies similares, mostrando que toda solución del sistema se aproxima a un estado de equilibrio en el cual una de las especies se extingue.

Partiendo de la ley logística de crecimiento: $\frac{dp}{dt} = a\,p - b\,p^2$ ( donde p representa el crecimiento de población ), y designando con $p_1(t)$ y $p_2(t)$ las poblaciones en el tiempo t, por $k_1$ y $k_2$ (***)

---

(*) Si se asigna como valor natural de $\underline{a}$ el de 0,029 estimado por algunos ecologistas ( lo que arroja que $\underline{b}$ valga $2.941 \times 10^{-12}$ ), la población humana de la Tierra, de acuerdo con esta ley logística, tiende al valor límite:

$$k = \frac{\underline{a}}{b} = \frac{0{,}029}{2.941 \times 10^{-12}} = 9{,}86$$

miles de millones de personas.

Es claro que en estas predicciones, los desarrollos tecnológicos, consideraciones de poluciones y tendencias sociológicas, influyen significativamente sobre los coeficientes vitales $\underline{a}$ y $\underline{b}$; consecuentemente, éstos deben ser revaluados cada pocos años (|4|, cap. V ).

(**) Excelente libro que contiene una buena presentación de aplicaciones.

(***) Recuérdese que p(t) se aproxima a una población límite $k = \frac{a}{b}$ cuando $t \to \infty$.

las poblaciones máximas que el microcosmos puede soportar y por $a_1p_1$ y $a_2p_2$ los potenciales bióticos ( ó tasas de crecimiento bajo condiciones ideales ), de las especies 1 y 2, respectivamente, las $p_1(t)$ y $p_2(t)$ satisfacen ( si nos restringimos al caso de especies aproximadamente iguales ) al sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dp_1}{dt} = a_1p_1 \left( \frac{k_1-p_1-p_2}{k_1} \right) \quad , \quad \frac{dp_2}{dt} = a_2p_2 \left( \frac{k_2-p_2-p_1}{k_2} \right) \quad ,$$

pudiéndose enunciar el siguiente *principio*: " Supuesto $k_1 > k_2$ , toda solución $p_1(t)$, $p_2(t)$ del sistema anterior se aproxima a la solución de equilibrio $p_1 = k_1$ , $p_2 = 0$ , cuando $t \to \infty$. En otras palabras, si las especies 1 y 2 son aproximadamente idénticas y el microcosmos puede soportar más miembros de la especie 1 que de la especie 2, entonces la especie 2 llegará finalmente a extinguirse " (*).

El problema 16 de los veintitrés planteados por David Hilbert en el segundo Congreso Internacional de Matemáticos ( París, 1900 ) ha conducido a una interesante interpretación ecológica entre dos especies interactuantes. Dicho problema da origen a sistemas de ecuaciones del tipo $\frac{dx}{dt} = x.f(x,y)$ , $\frac{dy}{dt} = y.g(x,y)$ , que introducen conceptos como el de ciclo " ecológicamente estable ". El interrogante, ¿ hay algún sistema depredador-presa con,al menos, dos ciclos ecológicamente estables ? , no tiene aún respuesta conocida ( |27|, cap. XIX ).

---

(*) En general, hay que poner $\alpha p_2$ y $\beta p_1$ en lugar de $p_2$ y $p_1$ en los sustraendos del sistema anterior, respectivamente, donde $\alpha$ y $\beta$ denotan grados de influencia de una de las especies sobre la otra. Un análisis similar al efectuado permite predecir el resultado de la lucha por la existencia para todos los valores de $\alpha$ y $\beta$. El caso que hemos analizado es el que corresponde á $\alpha=\beta=1$.

En una variedad de sistemas de circuitos eléctricos para la fisiología comparece el importante concepto matemático de oscilador no lineal. Muchos de ellos pueden describirse en términos de un modelo basado en la ecuación diferencial de B. van der Pol (1889-1959).

La transformación integral de Laplace suele ser de utilidad en muchos sistemas biológicos y fisiológicos que vienen descritos mediante ecuaciones diferenciales ordinarias. La razón de ello es que la composición de tales sistemas conlleva en el dominio ( ó espacio antiimagen ) ecuaciones diferenciales cada vez más complicadas, en tanto que en el espacio imagen aparecen descritas mediante operaciones algebraicas sencillas |16|.

En las recientes décadas hemos asistido al desarrollo de la *biología molecular*, fundamentándose la maquinaria básica de la herencia biológica sobre la geometría del DNA y la combinatoria de secuencias de aminoácidos. En esta área de la biología, ha constituído una verdadera sorpresa que la geometría diferencial global, cuya presencia ha sido por otra parte bien notoria en la teoría cúantica de campos, esté jugando ahora un papel crucial. Esto ha podido acontecer gracias a una fórmula debida a James H. White |38| y la teoría subyacente. Varios biólogos han conseguido comprobar que dicha fórmula describía ciertos fenómenos de la molécula DNA, existiendo también conexión con algunas enfermedades ( entre otras, con la llamada " del sueño ", ocasionada por el parásito humano trypanosoma ). Otras aplicaciones biológicas en relación con la fórmula citada, son dadas por W. R. Baüer, F. H. C. Grick y J. H. White |3|.

No podemos dejar de referirnos a la variedad de problemas biológicos en carcinogénesis, tales como el papel del ciclo de la célula, las interacciones celulares o el proceso de transformación celular. Entre los progresos realizados en esta dirección figuran, entre otros, el promovido por el modelo estocástico de Williams y Bjerkness |39| y el más reciente de Schürger y Tautu |32|, los cuales emplean un método que recurre a las funciones de transición como operadores, utilizando al propio tiempo la teoría de semigrupos. Es oportuno señalar también la existencia de una diversidad de modelos en relación con el debido entendimiento del ciclo de crecimiento de las células blancas de la sangre en sistemas sanguíneos normales y de mal funcionamiento, cuestión de gran interés en leucemia.

Un insondable mundo en el que se han realizado descripciones matemáticas muy sugestivas y en ocasiones imprescindibles para la investigación de grandes agrupaciones de células nerviosas interconectadas ( como ocurre en el cerebro ), ha sido el de las *redes neuronales*. Entre los instrumentos matemáticos en principio utilizados se incluyen métodos lógicos y álgebras de Boole. El interés en este campo comenzó a fomentarse cuando en 1943, el fisiólogo Warren S. McCulloch del M.I.T. (U.S.A.) y el matemático Walter Pitts de la Universidad de Pensilvania, desarrollaron un modelo abstracto supersimplificado de la neurona en forma de un autómata finito con sólo dos estados posibles: en marcha o parado. Oportunas combinaciones de estos módulos o neuronas formales, dieron lugar a modelos de sistemas nerviosos que permitieron formular diversas proposiciones, entre ellas, un teorema general de S. C. Kleene, que era capaz de caracterizar las clases de conducta que

cabía esperar de las redes neuronales de McCulloch-Pitts. El modelo neurológico de McCulloch-Pitts estimularía notables investigaciones ulteriores sobre la naturaleza del pensamiento y sobre la propia capacidad de los sistemas biológicos para autoorganizarse (*).

Entre todos los modelos matemáticos que han tratado de explicar el funcionamiento real de esos elementos básicos delsistema nervioso que son las neuronas, destaca el hoy ya clásico modelo del impulso nervioso desarrollado por A. L. Hodgkin y A. F. Huxley de la Universidad de Cambridge |20|, quienes idearon un sistema de ecuaciones diferenciales descriptivas del funcionamiento de un circuito eléctrico artificial de comportamiento similar al de las fibras nerviosas. Su trabajo, del que ofrecemos una brevísima ilustración (**), contribuyó a que les fuese otorgado un Premio Nobel de Medicina.

El impulso nervioso es una variación a modo de onda de la diferencia de potencial a través de la membrana del eje nervioso. Debido a la extrema pequeñez de la neurona, los citados investigadores realizaron en la década de los cincuenta, varios experimentos sobre ciertas fibras nerviosas ( axonas ) del calamar, cuyo grosor posibilita mediciones ( mediante electrodos finos ) de diferencias de tensión en la membrana lo suficientemente precisas para suministrar unos primeros datos fiables del modelo.

---

(*) En la actualidad, los problemas de redes neuronales siguen siendo del máximo interés. El XXIV de los Symposium anuales que se dedican a Cuestiones matemáticas en Biología, celebrado en Vancouver (Canadá) en Agosto de 1990, llevó por título "Redes Neuronales".

(**) Para mayores detalles, véanse |16|, |24|, entre otros.

Tras someter la axona a una tensión eléctrica exterior, bien sea positiva, ó negativa de pequeña cuantía, inmediatamente después de desconectar desciende hasta el potencial de base. Mas, si es negativa y su cuantía está por encima de un cierto umbral, se produce una excitación, es decir, la tensión queda rápidamente reforzada en un múltiplo de la proporcionada inicialmente y solamente después desciende hacia el estado de reposo.

Varios resultados experimentales mostraron que, tras una excitación, penetran iones de sodio en el eje nervioso durante la fase ascendente del impulso, abandonando dicho eje iones de potasio durante la fase descendente; y que la evolución en el tiempo de la tensión producida por la excitación depende de la concentración de iones de sodio en el medio.

Estos fenómenos hacen suponer que la excitación de la membrana tiene que ver con una alteración de la permeabilidad para los iones de sodio y de potasio.

Hodgkin y Huxley en 1952, midieron la corriente iónica cuando se mantiene constante el potencial de la membrana, y de los datos registrados dedujeron las leyes que rigen la dependencia de la permeabilidad del sodio y del potasio sobre el potencial de la membrana. Así formularon leyes que se apoyaban en el conjunto de cinco ecuaciones diferenciales que se explicitan seguidamente y cuya interpretación daba una buena idea del comportamiento de las fibras nerviosas (*):

La propagación del impulso nervioso, o potencial de acción, viene traducido por un proceso eléctrico descrito por la ecuación

---

(*) Un buen estudio ilustrativo del sistema de Hodgkin-Huxley es el de Fitzhugh [10].

en derivadas parciales no lineal:

$$I_m = \frac{1}{R} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = C \frac{\partial E}{\partial t} + I_i \quad ,$$

donde $I_m$ representa la corriente a través de cualquier segmento de la membrana, E el potencial de la membrana, R la resistencia del material de la célula en el interior de la membrana, C la capacitancia efectiva de la membrana é $I_i$ la corriente iónica. Esta última viene dada a su vez por:

$$I_i = \bar{g}_{N_a} m^3 h (E-E_{N_a}) + \bar{g}_K n^4 (E-E_K)$$

Las conductividades del sodio y del potasio dependen de tres variables sin dimensión (m, n, h) determinadas experimentalmente y que obedecen a las tres ecuaciones diferenciales no lineales:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{1}{\tau_m} (m_\infty - m)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{\tau_n} (n_\infty - n)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\tau_h} (h_\infty - h)$$

En uno de los tres Congresos estivales que se celebraron durante el período 1966-68 sobre Biología teórica en la localidad italiana de Bellaggio, patrocinado por la International Union of Biological Sciences, y al cual fueron invitados genéticos, especialistas en redes nerviosas, biólogos experimentales, matemáticos, químicos y físicos, el matemático E. Ch. Zeeman de la Universidad de Cambridge aportó unos modelos topológicos para dos procesos fisiológicos: el del latido del corazón y el del impulso nervioso. El último de ellos causó gran revuelo, debido a que su esquema proporcionaba no sólo una mejor comprensión conceptual que

el modelo cuantitativo de la bioquímica de dicho impulso al que acabamos de referirnos de Hodgkin- Huxley, sino que requería menos ecuaciones que el de este último.

Los modelos presentados por Zeeman se basaban en una teoría, ya cimentada desde 1964, y debida al genio del matemático francés René Thom, uno de los primeros especialistas mundiales en topología diferencial ( que, al igual que Zeeman, también figuraba entre los invitados al ciclo de Bellaggio ). El fundamento de esa teoría consistía en la descripción de los fenómenos discontinuos de la naturaleza con la ayuda de modelos matemáticos continuos; en lenguaje matemático, trataba esencialmente de la transformación de unos conceptos abstractos en ciertas formas geométricas llamadas *catástrofes*. En contraposición con la teoría newtoniana que sólo considera fenómenos regulares y continuos, la *teoría de catástrofes* nacía para configurar un método universal destinado al estudio de todas las transiciones con saltos, discontinuidades y cambios bruscos de cualquier forma y especie ( como catástrofes se identificaban, por ejemplo, un súbito desequilibrio nervioso ó la repentina explosión de una burbuja ).

El propósito de Thom, tal y como emergió de su mente, apuntaba ante todo hacia un lenguaje matemático para la biología. Un área primordial de su teoría era la de la *morfogénesis* u origen de la forma en la vida y en la naturaleza inorgánica. Para Thom, apasionado estudioso de la embriología, las matemáticas de los cursos estables del cambio y las matemáticas de la forma biológica eran las mismas, en base a que toda forma de un organismo representa un registro parcial de los procesos de desarrollo y me-

tabolismo (*). Obsesionado con el problema de su descripción, crea Thom un contexto matemático basado en el supuesto de una estabilidad estructural de la naturaleza que hace hincapié en la regularidad cualitativa, en vez de hacerlo en la cuantitativa (**).

La raíz de sus elucubraciones habría que buscarla principalmente en la conexión existente entre el cálculo de variaciones y cierto tipo de singularidades " planimétricas " estudiadas por el americano H. Whitney (***) y relacionadas especialmente con la estabilidad de movimientos de los sistemas dinámicos, esto es, de la dinámica cualitativa que tuvo su origen en Poincaré (1854-1912). Convencido de que la topología podía servir como lenguaje natural idóneo para definir los conceptos de forma y cambio estructural, Thom revolucionó la matemática aplicada con el desarrollo de una dinámica cualitativa adaptándola especialmente a las biociencias.

La propiedad que Thom designa como *estabilidad estructural*, subyacente a la teoría entera, se manifiesta en sí misma en una

---

(*) Influyó sin duda en sus investigaciones la excelente obra de Thompson ( On Growth and Form - Cambridge University Press,1917 ) en la que se exploran aspectos matemáticos y físicos de la forma natural. Tampoco le pasó por alto el reto en 1940 a los biólogos del físico alemán B. Bavink de que se relegase a segundo término el concepto de cantidad mensurable y contable, colocando en el primero el concepto básico biológico de forma ( ó *gestalt* ).

(**) Thom escribe " toda la ciencia se basa en la suposición implícita de estabilidad estructural " , y también " la ciencia es posible sólo si las observaciones y los resultados son cualitativamente repetibles ".

(***) La teoría de singularidades es una amplia generalización del estudio de funciones en puntos máximos y mínimos; y en la teoría de Whitney las funciones se sustituyen por aplicaciones ( en general, colecciones de varias funciones de varias variables ). René Thom y E. C. Zeeman llegaron a sugerir que la combinación de la teoría de singularidades y sus aplicaciones debería llamarse teoría de catástrofes.

constancia local de estructuras cualitativas (*).

Que las concepciones de Thom no carecían de precedentes se pone de manifiesto si recordamos que ya dos matemáticos rusos, Andronov y Pontryagin, habían desarrollado en 1937 la dinámica cualitativa de Poincaré en una definición general de la estabilidad estructural. Tuvieron que superar algunos delicados planteamientos. Para ellos, dadas las ecuaciones que describe cualquier sistema dinámico, una cuestión crucial era saber cómo se distribuían topológicamente las soluciones estables de dichas ecuaciones: ¿ representaba un estado estable del sistema parte de una gama continua o un reducto aislado rodeado de inestabilidad ? ¿ podría un pequeño cambio cuantitativo alterar ligeramente las soluciones o bien produciría otras nuevas muy diferentes ó incluso llegaría a no dejar ninguna ?

Años más tarde Thom, que había trabajado intensamente en la relación de las singularidades topológicas con las específicas del cálculo, se percató de que un adecuado conocimiento de la " disposición " o estructura de los máximos y mínimos de un proceso era en general equivalente a conocer su comportamiento cualitativo, encontrándose así con una cuestión fundamental: ¿ cuántas estructuras topológicamente diferentes eran posibles ?

Imbuído en la creencia de que debía haber ( al menos para los procesos simples ) un número limitado de estructuras arque-

---

(*) Dos experimentos no dan nunca los mismos resultados cuantitativos, porque las condiciones experimentales no pueden reproducirse exactamente y las perturbaciones externas no quedan eliminadas por completo. Grosso modo, la propiedad de estabilidad estructural pretende expresar que, en base al credo científico en un orden preestablecido para el universo que presupone que en general los experimentos se pueden repetir, aún cuando no fuera en forma de reproducción exacta, lo que se espera que ocurra es que al repetirlos *aproximadamente* en las mismas condiciones, se deben obtener *aproximadamente* los mismos resultados (|31|, pág. 21).

típicas, algo así como un desdoblamiento único para cada singularidad, en 1965 llega a una notable conclusión: que para una serie muy amplia de procesos, sólo eran posibles siete desdoblamientos estables, a los que llamó *catástrofes elementales* |40|.

El libro de Thom |35| apareció en 1972, con un prefacio de Waddington (*) quien lo comentaba como una contribución muy importante a la filosofía de la ciencia y en particular a la biología teórica. La tesis que sostiene la obra y que refleja su título *Stabilité structurelle et morphogénèse* es, resumiendo, que las formas descritas por la teoría de catástrofes y en particular las siete catástrofes elementales,representan en definitiva, unas formas elementales cuyas combinaciones permiten recrear la infinita sucesión de formas naturales. Ahora bien, esto no es debido al azar, sino a una morfogénesis cuya lógica interna es la teoría matemática de la estabilidad estructural.

Sin entrar en detalles, la teoría de catástrofes se interesa en sistemas cuyo estado viene descrito por n variables *internas* ( variables de estado ) y cuyo comportamiento ( normalmente regular, aunque pudiendo presentar irregularidades ) se encuentra bajo el control de m parámetros *externos* ( factores de control ).

Dos hipótesis son necesarias para aplicar la teoría de catástrofes en su forma actual: la primera, es que el sistema descrito se rija por un potencial; la segunda, que el número de factores

---

(*) C. H. Waddington, profesor de genética animal en la Universidad de Edinburgo y presidente de la International Union of Biological Sciences, fué el primer científico de categoría que aclamó la teoría de catástrofes. Experto en morfogénesis, mantuvo que la bioquímica sóla no puede explicarla, sugiriendo ya desde 1940, que para el estudio apropiado de las formas biológicas sería deseable una teoría que hablase en términos de " operadores topológicos ". Thom se propuso inicialmente dar una mayor precisión al concepto de *creodo*, inventado por Waddington para ayudar a explicar algunas de las propiedades de desarrollo de los organismos.

de control de los que depende su conducta sea limitado ( por razones matemáticas difíciles de justificar aquí, se supone siempre $m \leq 4$ ).

Un proceso de abstracción topológica hizo posible el llamado *teorema de clasificación* de Thom (1965), en virtud del cual " en un sistema gobernado por un potencial y cuyo comportamiento depende de un número de variables de control no mayor que cuatro, sólo son posibles siete catástrofes distintas, es decir, siete tipos de discontinuidad cualitativamente diferentes ( no interviniendo en ninguna de ellas más de dos variables de estado " (*).

Ya hemos dicho que Thom, de hecho, se había apoyado en su convencimiento de que las formas cualitativas, geométricas, topológicas de comportamiento que se observaban en las catástrofes elèmentales debían repetirse en muchos procesos (**), lo que matemáticamentesignificaba demostrar la existencia y unicidad de esas

---

(*) J. Guckenheimer, experto en teoría dinámica y en topología, expuso en 1973 un contraejemplo para el teorema de Thom en el que daba a entender que el " siete mágico ", tan elogiado por los especialistas en teoría de catástrofes, debía ser aumentado para que el teorema fuese correcto.

(**) En el siglo XVIII, los científicos quedaron asombrados al descubrir que las celdas de un panal estaban muy próximas a utilizar el mínimo absoluto de cera para cerrar un volumen dado, ¿ les permitían a las abejas sus instintos resolver un problema de cálculo de variaciones ? Hoy nos damos cuenta de que la presión de los cuerpos de las abejas a trabajar la cera suave y templada es suficiente para dar la razón al fenómeno. Cada pared de una celda está sometida a presión por ambos lados y adopta una forma que iguala esa presión tanto como es posible. Las celdas son de sección exagonal por la misma razón que una bandeja de peniques, si se sacude hasta que los peniques estén pegados los unos a los otros, presenta una colocación exagonal. No importa que los movimientos de las abejas sean muy diferentes y mucho más complejos que las vibraciones de la bandeja. La forma cualitativa, geométrica, que resulta es la misma ( Transcrito de |40|, págs. 41 y 42 ).

Volvemos a insistir en que para Thom, " en la Ciencia sólo cuentan las experiencias que se repiten. La experiencia efectuada no será considerada como válida, más que si otro experimentador, que efectúa la misma experiencia en otro tiempo y en otro lugar, obtiene sensiblemente la misma morfología que en la primera experiencia"(|36|, p. 11).

siete formas abstractas, debiendo ser además estructuralmente estables.

Las denominaciones de esas siete catástrofes elementales son las siguientes: el pliegue, la cúspide, la cola de milano, la mariposa, y las umbilicales hiperbólica, elíptica y parabólica (*). El teorema fundamental de la teoría de catástrofes, interpretado en dimensión 3 ( tres parámetros externos ), enuncia la existencia de cinco conjuntos de catástrofes elementales. A cada una de ellas está asociado un sistema descrito por un potencial dependiente de una ( pliegue, cúspide, cola de milano ) o de dos variables internas ( umbílicas hiperbólica y elíptica ). La extensión a cuatro parámetros implica la introducción de dos formas nuevas ( mariposa, umbílica parabólica ).

Entre otras muchas aplicaciones, puede asegurarse que las tres catástrofes umbilicales dirigen muy verosímilmente en Biología, por ejemplo, la organogénesis de los procesos de captura ( fagocitosis en los unicelulares ) y de la sexualidad ( formación y emisión de gametos ). El blastopore en la gastrulación de los anfibios proporciona un ejemplo probable en Embriología, de la cola de milano. Ha llamado la atención, asímismo, las similitudes de formas entre el desdoblamiento de la catástrofe umbílica hiperbólica y la formación del pie y la cabeza de una seta, así como entre el embrión de un erizo de mar y el de la catástrofe umbilical elíptica.

---

(*) Las denominaciones de las cuatro primeras vienen sugeridas por los rasgos visuales de los gráficos que las describen; las de las tres restantes - difíciles de visualizar - llevan nombres matemáticos.

La teoría de catástrofes, que llegó a considerarse para algunos, como uno de los principales movimientos intelectuales del siglo, fué contrastada, atacada y defendida en los términos apropiados a una teoría científica. Un buen número de artículos han sido dedicados sistemáticamente a la crítica de la misma. Entre ellos, pueden citarse el de J. Guckenheimer |15|, el del biólogo matemático Jack Cowan (*); el del biólogo B. Goodwin (**), los de los matemáticos Steven Smale (***) y H. J. Sussmann y R. S. Zahler (****), ... Otros muchos, como el ya citado C. H. Waddington (^), es decidido defensor de la teoría, así como E. C. Zeeman, quien hizo patente en varios notables artículos que compartía las ideas de Thom (^^), etc ...

En realidad, lo que importa de una teoría es lo útil que puede resultar, y nó los argumentos en su favor o en contra. Una gran ventaja de la teoría de las catástrofes es la de poseer la garantía de que las conclusiones basadas en la misma son estructuralmente estables, lo que no es frecuente con muchos otros métodos.

---

(*) Cowan sostiene que " la biología está llena de oscilaciones y de ciclos más o menos estables en todos los niveles y es raro encontrar un potencial claro que haga la situación estrictamente tratable en términos de la teoría de catástrofes " (|40|, p. 88).

(**) Que dejó escrito, " Creo que las percepciones cualitativas de la conducta de los sistemas dinámicos que proporciona la topología debe combinarse con un análisis cuantitativo "(|40|,p.44).

(***) Smale, medalla Fields, afirma que " la teoría tiene más de filosofía que de matemáticas ".

(****) Quienes dirigieron una polémica poniendo en entredicho la universalidad y el valor de la teoría, declarando que eran exageradas las pretensiones de la misma |34|.

(^) La influencia de Waddington sobre Thom se trasluce cuando éste afirma que la vida es un proceso en el que se transmite estabilidad, nó simplemente un ordenamiento dado por genes. Fué Waddington quien acuñó la palabra *homeorhesis* (v.g. "mismo camino") para los procesos de desarrollo biológico que siguen un curso estable de cambio.

(^^) Para ilustrar una de las catástrofes elementales, Zeeman llegó a diseñar una curiosa máquina (una especie de aparato de cartón y goma). Discrepaba de Thom en cuanto al modo de usar la teoría.

Al configurarse además, como una teoría topológica, proporciona directamente resultados cualitativos |31|.

Hoy en día ha aparecido la teoría de catástrofes *generalizada*, la cual abandona la hipótesis de que la dinámica del campo derive de un potencial |8|.

Al margen de los ejemplos anteriormente citados, la teoría de catástrofes ha venido aplicándose a la biología en muchos de sus campos, desde la bioquímica a la genética, a la embriología y a la teoría de la evolución. Entre los curiosos modelos existentes, es muy conocido, si bien duramente criticado, el de aplicación en el estudio del comportamiento animal debido a Zeeman y referido a la conducta agresiva en el perro. En este modelo, son factores dominantes de control, el enfado ( que sólo hace que el perro ataque ) y el miedo ( que sólo le hace huir o someterse ). El modelo refleja los diferentes cursos de estados agresivos o sumisos, donde la conducta neutral más probable es la de niveles bajos en ambos estados y poco probable cuando ambos son fuertes.

Otro ejemplo interesante es el del comportamiento territorial que despliega el urogallo.

Modelos más complejos permiten mostrar cómo interactúan las diferentes especies en cuanto a sus comportamientos, ó cómo cambian esas interacciones con el tiempo.

El análisis cualitativo de la teoría de catástrofes sugiere asímismo, las diversas maneras con las que puede controlarse la formación de nubes de langostas.

Añadamos, para terminar, que la denominada " semiología topológica " |23|, basada en la teoría de catástrofes elementales, se ha aplicado con éxito para la interpretación de imágenes radiográficas ( formas estáticas ) y registros periódicos ( E.C.G. ).

Algunos matemáticos opinan que para el estudio de las discontinuidades de la naturaleza, existen otras técnicas matemáticas ya desarrolladas, quizás mejores que la teoría de catástrofes, como las de la teoría cuántica, teoría de ondas de choque y especialmente el campo muy activo de la teoría de la bifurcación. En particular, esta última teoría supone un desafío al principio de Thom de la estabilidad estructural. No obstante, y de hecho, hay una estrecha correspondencia entre la teoría de catástrofes y la de la bifurcación, y en una muy buena parte de casos, sus matemáticas se superponen ó mejor aún, devienen equivalentes.

En realidad, cabe decir que singularidades, bifurcaciones y catástrofes, representan términos diferentes para describir la aparición de estructuras discretas ( esto es, no continuas ) a partir de estructuras suaves, regulares y continuas. Si la catástrofe constituye el salto brusco surgido como respuesta de un determinado sistema ante una alteración suave en las condiciones externas, la *bifurcación* ( palabra sinónima de " ramificación " ), designa generalmente cualquier metamorfosis cualitativa del sistema frente a un cambio en los parámetros de los que depende.

La teoría de la bifurcación nació con las investigaciones del matemático Leonhard Euler a mitad del siglo XVIII y comenzó a adquirir significación con el primero de los trabajos ya citados de H. Poincaré (*) de finales del siglo XIX. La teoría trata de un cuerpo de técnicas para estudiar las soluciones de ecuaciones diferenciales ( en general, en derivadas parciales ) no lineales cuyo carácter cambia de manera discontinua cuando los parámetros que

---

(*) Thèse: " Sur les proprietés des fonctions définies par les équations aux differences partielles " (1879).

intervienen en las ecuaciones atraviesan ciertos umbrales.

El proceso de la bifurcación es importante en la estabilidad estructural, en ciertas reacciones químicas, en las inestabilidades en plasmas y ocurre también en flujos turbulentos; en particular, el arranque de uma turbulencia puede ser descrito matemáticamente por bifurcaciones sucesivas, que conducen a una transición del orden hacia el desorden.

Hasta primeros del decenio de 1960 la mayoría de los científicos y muy en especial los biólogos, no habían prestado especial cuidado a las bifurcaciones que llevan a un estado errático, por no tener quizás unos alicientes concretos que les impulsasen a explorar el comportamiento desordenado y, por otro lado, si bien los matemáticos ya habían reparado en las bifurcaciones, tampoco poseían incentivos suficientes que les indujesen a describir para qué servía el desorden.

Pero el sorprendente hallazgo de que algunas ecuaciones matemáticas muy sencillas podían modelar sistemas tan violentos como una cascada; y más en general, la apreciación de que ciertos comportamientos dinámicos complejos debidos al efecto de fuertes no linealidades, se encontraban particularmente ligados a lo que sería llamado el *caos* en biología en los problemas de equilibrio de poblaciones, así como a notables cuestiones de mecánica celeste, de física de aceleración de partículas y de cinética química, alteró sensiblemente el norte preferencial de algunos senderos de la investigación científica.

Se puso decididamente mucha mayor atención al hecho de que algunos contextos matemáticos, y en especial, la teoría de la di-

námica de los sistemas no lineales (*), coadyuvaban en gran medida a comprender una diversidad de fenómenos, como el de las epidemias, el de los cambios climatológicos, el de la formación de las nubes, el de los complicados ritmos del corazón humano, etc.., siendo esto el origen del interés inusitado por un tipo de problemas que en el pasado sólo concentraba adeptos en la mecánica celeste.

Conceptos nuevos involucrados en los comportamientos complejos de algunos sistemas dinámicos, propulsaron el desarrollo de teorías espectaculares; entre ellos, los de *caos*, *fractal*, *atractor extraño*, ...

El primero sobrevino a raíz del descubrimiento de que algunos sistemas deterministas muy simples, con solo unos pocos elementos podían generar comportamiento errático, llamándose *caos* a la aleatoriedad así generada. Hoy quizás sea válido reemplazar las palabras *catástrofe generalizada* por las de *caos determinista*.

El término *fractal*, debido a Benoit B. Mandelbrot, matemático del Instituto Thomas Watson de I.B.M., culminó en una geometría sorprendente de la naturaleza. La imagen de un fractal, tal y como fué concebido, consta de fragmentos geométricos de orientación y tamaño variable, pero de aspecto similar. Una notable particularidad en el caso de la geometría de fractales, es que la noción de longitud carece de significado, y para cuantificar de qué modo llena el espacio un fractal hay que acudir al concepto matemático de dimensión.

---

(*) Es bien sabido que un sistema dinámico consta de dos partes: la noción de estado ( la información esencial sobre aquél ) y una dinámica ( regla que describe cómo evoluciona el estado en el tiempo ). El ejemplo clásico más conocido de sistema dinámico es el del péndulo simple. En un sentido muy amplio, cuando el sistema no responde a los estímulos en proporción directa, se dice no lineal.

Los fractales tienen dimensión fraccionaria ( no entera )(*), la cual representa el medio de ponderar cualidades carentes de una definición clara como el grado de escabrosidad , discontinuidad o irregularidad de un objeto (**).

En lo que concierne a las ciencias de la vida, varios biólogos teóricos se apercibieron de que en el cuerpo humano abundan las estructuras fractaliformes. Pudo registrarse que las neuronas constituyen ejemplos de estructura fractal; así como que el cuerpo celular se ramifica en dendritas, las cuales se escinden, a su vez, en fibras más finas, estructura que puede tener relación con el caos en el sistema nervioso. Algunos investigadores, por otra parte, recurrirían recientemente a la geometría fractal para tratar de explicar anomalías en las pautas de flujo sanguíneo que penetra en el corazón sano.

Se comprobó asímismo y a sabiendas de que la descripción " exponencial " clásica de la ramificación de los bronquios no era satisfactoria, que la fractal encajaba con los datos; y muchas otras diversas aserciones como, por ejemplo, la de que el sistema

---

(*) La dimensión fractal no es otra que la dimensión de Hausdorff-Besicovitch, que permite asignar medidas a conjuntos para los cuales la medida usual de Lebesgue resulta inadecuada. En la geometría clásica (la euclídea), las rectas tienen dimensión uno, los círculos dimensión dos y las esferas lo son de tres. Así, mientras que una línea euclídea llena exactamente un espacio unidimensional, una línea fractal se desparrama en un espacio bidimensional; consecuentemente, una línea fractal - la de la costa, por ejemplo - tiene una dimensión comprendida entre uno y dos; y análogamente, una superficie fractal - una montaña, verbigracia - tiene dimensión intermedia entre dos y tres.

(**) Para Mandelbrot, la existencia en la naturaleza de numerosas figuras irregulares y fragmentadas, no parece discutible; pero que el grado de irregularidad y fragmentación sea mensurable, es una idea que no sólo no logró imponerse en el pasado, sino que aún exige ulteriores elucubraciones para que sea aceptada ([1], p. 135 ).

colector urinario y el del conducto biliar en el hígado, resultaban ser fractales(*). Aún más y en definitiva, que eran fractales las estructuras que proporcionaron la clave de la dinámica no lineal. No obstante, la teoría incomprensiblemente no acabó de cuajar del todo en el seno de algunos colectivos científicos, y la euforia fractal declinó, atravesándose períodos de indiferencia.

Desde un ángulo matemático, el conjunto de las bifurcaciones de una clase de sistemas dinámicos deterministas ( cuyo comportamiento viene descrito por una recurrencia o una ecuación diferencial ), posee una estructura fractal en el espacio de sus parámetros; es decir, la organización de este conjunto resulta similar a la de sus partes, incluso infinitesimales. Ahora bien,todo esto se encuentra en conexión con la aparición de un complicado comportamiento dinámico que traduce la presencia de un tipo de situaciones que parecen no llevar ni a un estado estable ni a un curso estable de cambio ( por ejemplo, estado estacionario no constante y no periódico, entre otros ) y en el que queda inmerso un nuevo concepto, el de *atractor extraño*, que permite hablar de comportamiento caótico para los sistemas atrapados por esos atractores (**).

En 1963, Edward N. Lorenz, del M.I.T. (U.S.A.), descubrió el caso de un sistema con pocos grados de libertad que tenía un comportamiento extrañamente complejo. El sistema se manifestaba de una forma errática que se desentendía de toda caracterización basada en cualquiera de los tres tipos de atractores que hasta esa fecha se conocían.

En la construcción de aproximaciones sucesivas de soluciones

(*) Basado en un principio de aleatoriedad, el biólogo A. Lindenmayer desarrolló en 1968 un modelo para la descripción de formas de plantas aunque con una variable determinista. Esto condujo a una clase especial de fractales que se denominarían sistemas L.

(**) En términos groseros, un atractor es a lo que tiende, o a lo que es atraído, el comportamiento de un sistema. Hasta hace relativamente poco tiempo, los puntos fijos, los ciclos límites y las superficies toroidales, eran los únicos atractores conocidos.

de ese sistema de ecuaciones de Lorenz, los experimentos numéricos sugirieron la existencia de un conjunto de atracción de dimensión algo mayor que dos, que tenía una complicada estructura topológica. El atractor observado, llamado hoy *atractor de Lorenz*, fué el primer ejemplo de atractor caótico o *extraño* (*).

La índole determinista de los modelos dinámicos construídos con estos atractores consienten cierta predecibilidad. El ecólogo W. M. Schaffer, que ya había computado exponentes de Lyapunov (**) y mapas de Poincaré, usa atractores extraños para explorar la epidemiología de enfermedades infantiles, tales como el sarampión y las viruelas locas ( con técnicas de reconstrucción del espacio de fases mostraría, por ejemplo, que el sarampión obedece a un atractor extraño, cuya dimensión fractal es aproximadamente de 2,5 ) (|11|, p. 315) (***).

---

(*) En un notable artículo aparecido en 1963 ( *Deterministic nonperiodic flows*, J. Atmos. Sci. 20, 130-141 ), cuyo objetivo inicial era estudiar el fenómeno de convección en la atmósfera de la Tierra por caldeamiento de su región inferior y enfriamiento de la superior, el meteorólogo E.N. Lorenz dedujo su ya famoso sistema autónomo no lineal de ecuaciones diferenciales:
$dx/dt = \sigma(y-x)$, $dy/dt = rx-y-xz$, $dz/dt = xy-bz$ ($\sigma$,r,b=parámet. posit.)
La figura a la que conduce la aproximación numérica de una solución de este sistema es una especie de espiral doble, semejante a las alas de una mariposa, en la que se describen o entretejen unos lazos sin aparente regularidad en su número, y dependiendo el subsiguiente número de lazos sensiblemente de los valores iniciales, de tal modo que una pequeña perturbación de éstos, produce otra serie alternante de lazos. A esta figura se la conoce como "mariposa de Lorenz".
Es sorprendente que la belleza del artículo de Lorenz y sobretodo sus ideas, fueran ignorados nada menos que durante unos diez años.

(**) Estos exponentes representan unos números que en un sistema proporcionan un método para medir los efectos antagónicos de estirar, contraer y plegar, en el espacio de fases de un atractor.

(***) Consideramos oportuno añadir que un atractor caótico puede interpretarse como un fractal, en el sentido de objeto que va revelando nuevos detalles, a medida que se va amplificando.

Debemos puntualizar que sería principalmente en la década de 1970, cuando diversos grupos de matemáticos, físicos, biólogos y científicos de la vida, haciéndose eco de los desórdenes de que adolecía la naturaleza, indagaron con mayor profundidad nexos entre las diferentes clases de irregularidades. Los matemáticos, como ya anticipamos, se enfrascaron más detenidamente en los sistemas dinámicos, reparando algunos en que la turbulencia en los fluidos podía estar relacionada con la fenomenología de los atractores extraños, y hallàndo soluciones caóticas en ecuaciones similares a las de la cinética química y en las que gobiernan la dinámica de neuronas. Muchos físicos ( con especial énfasis por parte de algunos norteamericanos como Joseph Ford en Georgia, Robert Shaw en California y otros ), llegaron a decidir que la dinámica no lineal era el futuro de la física ( ¡ todo el futuro ! ). Los fisiólogos encontraron un insólito *orden* en el caos que sobreviene en el corazón humano, como causa primera de inexplicables muertes súbitas (*). Los ecologistas polemizaron abiertamente entre sí, respecto de la forma de ver el mundo ( para algunos, las poblaciones eran en general, uniformes y constantes, bajo la égida de un determinismo regulador; otros concluían que eran más bien irregulares y que lo que las trastornaban eran factores ambientales impredecibles, criterio que anulaba cualquier hipótesis determinista ). Y aquellos que poseían sólidos

(*) A raíz de que en estos últimos cinco años se descubriera que el corazón y otros sistemas fisiológicos se comportan generalmente de modo errático cuando son jóvenes y sanos, y que contrariamente a lo que por intuición cabría esperar, el envejecimiento y la enfermedad suelen ir acompañados de comportamientos de regularidad creciente, los fisiólogos actuales conciben al caos como señal de salud, y la disminución de alterabilidad y acentuación de periodicidades lo asocian con la enfermedad [13].

conocimientos matemáticos se esmeraron en tratar diversos grupos de criaturas como sistemas dinámicos. Los epidemiólogos, en base al análisis de ciertos registros de epidemias de sarampión y de otras enfermedades, y en general los estudiosos de la dinámica de poblaciones, descubrieron que sencillos modelos deterministas podían acarrear asombrosos comportamientos pletóricos de azar; finalmente, los biólogos moleculares se dispusieron a concebir las proteínas como sistemas en movimiento.

Unos diez años más tarde, todas esas percepciones y dinamismo desplegado para comprender el desarrollo de la complejidad en la naturaleza, se tradujo en una nueva ciencia bautizada por muchos bajo el nombre de *caos* (*), cuyo propósito no era otro que el de forjar un método para ver orden y pauta donde antes sólo era observado el azar, la irregularidad y lo impredecible. Se llegó al extremo de decir que " la ciencia clásica acaba donde el caos empieza ". Algunos la llamaron ciencia *no lineal* (|11|,p.11) (**).

Hay que añadir ahora que, si bien es verdad ( como oportunamente fué advertido ) que hubieron épocas en que una buena parte de matemáticos y físicos optaron por dar la espalda a las imágenes excéntricas de los fractales de Mandelbrot, los frutos de las nuevas investigaciones hicieron reverdecer la nube de polvo de Can-

---

(*) Entre la gran profusión de obras y trabajos aparecidos últimamente, destacamos aquí las recientes colecciones de excelentes artículos sobre *caos* ( estudios experimentales, caracterización de fenómenos caóticos, etc ... ) que pueden verse en *Directions in CHAOS* (vols. I, II, III y IV), Edit. Hao-Bai-Lin, World. Scientific. Publ. Co., Singapore (1990).

(**) El matemático Stanislas Ulam ironizó al respecto diciendo que llamar " ciencia no lineal " al estudio del caos, era definir la zoología como el " estudio de los animales no elefantes ".

tor, el copo de nieve de Koch, el triángulo de Sierpinski, la curva de Peano y, en definitiva, todo cuanto configuraba aquella geometría que el científico de la I. B. M. decía que era necesario que se aplicase para desvelar nuestro universo real, áspero y escabroso, con su inmensa variedad de formas naturales ( nubes, montañas, árboles, capilares sanguíneos, pulmones, ... ), imposibles de describir mediante la geometría estudiada en los últimos dos mil quinientos años.

Alcanzó entonces su óptimo esplendor la esencia del mensaje de Mandelbrot (*): que muchas de las estructuras de la naturaleza que aparentan tener una complejidad extraordinaria, poseen realmente una misma regularidad geométrica (**). Pero sobretodo se hizo patente el evidente paralelismo de esta teoría con la del caos determinístico de la dinámica no lineal, hasta tal punto que en estos últimos años, la geometría fractal ha revelado mucho sobre la naturaleza oculta del caos y el orden en el universo natural (***).

---

(*) Con la renacida euforia surgieron ulteriores extensiones que suministrarían bases de avances significativos en el análisis de los sistemas dinámicos y en el de los atractores caóticos, como (entre otros) el análisis multifractal.

(**) Se trata de una propiedad que caracteriza a los sistemas que ofrecen el mismo aspecto a diversas escalas (de longitud o de tiempo) y que es llamada *autosemejanza*.

(***) Un claro exponente del binomio orden-caos lo constituye el modelo de Mandelbrot de 1980, el cual se define matemáticamente como el conjunto de todos los puntos del plano complejo que dan origen a un conjunto de Juliá conexo. Su fabulosa riqueza en formas y estructuras se contrapone fuertemente con la sencillez de las reglas que lo describen.

El conjunto de Mandelbrot se ha llegado a catalogar como el "más complejo objeto de la matemática". Entusiasmado con su hallazgo, increíble combinación de absoluta simplicidad y vertiginosa complicación, dice Mandelbrot "no me cansaría de devanear sobre la belleza de este conjunto".

Muchos científicos defendieron calurosamente la necesidad de enseñar el caos, propugnando una rápida estructuración de los programas matemáticos en la enseñanza universitaria por considerarlos plagados, incluso en cursos avanzados, de teorías aferradas al vasto campo de la linealidad, a causa sin duda de su fructífera aplicación a numerosos problemas lineales fundamentales de las ciencias físicas, pero marginando con ello una indispensable y temprana educación matemática en sistemas como los no lineales, de abrumadora presencia en el mundo en que vivimos (*).

La existencia del caos afectó, por otra parte, al mismo *método* científico, representando un abierto enfrentamiento al punto de vista *reduccionista*, en virtud del cual, y como se sabe, un sistema puede entenderse descomponiéndolo para estudiar cada parte por separado, criterio que, desde que se impuso en la mecánica clásica ( para invadir luego las otras ciencias ), ha prevalecido en buena medida debido a la presencia de gran número de sistemas en los que el comportamiento del todo es realmente la suma de los comportamientos de sus componentes |7|.

Ese método científico, encaminado directamente a simplificar la complejidad de los fenómenos, se remonta a Galileo, quien en principio la reduce a una explicación en términos de unos cuantos elementcs simples, de unas cuantas variables mensurables: espacio, velocidad, tiempo. Después Newton dió forma a las leyes de la diná-

---

(*) El biólogo matemático Robert May de Princeton, pionero en la investigación del caos mediante la "duplicación de períodos", escribe al respecto en *Nature* (Junio 1976): " La intuición matemática así desarrollada equipa mal al estudiante para enfrentarse con el extravagante comportamiento exhibido por el más sencillo de los sistemas no lineales discontinuos, como la ecuación "logística" de la dinámica de poblaciones. Semejantes sistemas no lineales son seguramente la regla, nó la excepción, en todo lo que no concierna a las ciencias físicas ..... No sólo en la investigación, sino también en el mundo cotidiano de la política y la economía, saldríamos ganando si más personas comprendieran que los sistemas no lineales sencillos, no poseen necesariamente propiedades dinámicas simples".

mica expresándolas mediante ecuaciones diferenciales bien determinadas ( ecuaciones *deterministas* ) (*).

La belleza y simplicidad de la mecánica newtoniana haría caer luego a Laplace y otros de sus ilustres colegas en un dogmatismo cientifista (**) en el que se oculta el prejuicio, hondamente arraigado hasta hace sólo unos veinte años en la inmensa mayoría de los científicos, de compartir un cuerpo de creencias acerca de la complejidad: las leyes simples deben llevar a resultados simples; por contra, la complejidad tan frecuente en la naturaleza - la turbulencia de una cascada o de una tormenta, la intrincada organización de los seres vivos, por ejemplo - aparece como consecuencia de leyes complejas o de infinidad de factores (***). Además, diferentes sistemas se comportan de manera distinta.

---

(*) Una propiedad muy importante de la teoría newtoniana es que las soluciones de las ecuaciones del movimiento quedan determinadas, para todo tiempo futuro o pasado, una vez conocidas las posiciones y velocidades actuales. Ello significa que, conociendo el presente, cabe predecir el futuro o retrotraernos al pasado.

(**) En opinión de Laplace, las leyes de la naturaleza implican un determinismo estricto y una predecibilidad completa, aunque las imperfecciones de las mediciones exigieran introducir la teoría de las probabilidades |7|.

" Puesto que toda la realidad - concluye Laplace - se reduce al mundo físico y éste a su vez a las leyes de la mecánica, un observador que conozca con precisión absoluta el estado de las cosas en un momento dado será capaz, en principio - mediante el cálculo y aquellas leyes - de determinar el futuro con total certeza ".

(***) El problema de la interacción gravitatoria entre tres cuerpos ( por ejemplo, Sol-Tierra-Luna ) estudiado por Newton, es un contraejemplo que muestra la inexactitud de este prejuicio. El matemático Henri Poincaré probó que el problema de tres cuerpos resulta *irreducible* al de dos cuerpos, al presentar el primero un tipo de inestabilidad asintótica que no se dá en el último.

Un conjunto de problemas de gran actualidad, con el comportamiento desordenado como telón primordial de fondo, abrieron nuevas perspectivas respecto de la interpretación reduccionista de la mecánica clásica.

Ello permitió ver que un sistema determinista puede volverse indeterminado. Que unas leyes deterministas muy simples - como en ciertos casos, la de la gravedad - pueden dar lugar a comportamientos complejos. Y dándole la vuelta al razonamiento, que una evolución temporal complicada puede provenir en determinadas ocasiones, de leyes simples.

Algo llamado caos condujo inexorablemente a la desaparición del programa reduccionista de la ciencia. Al asestar un golpe de gracia a los dogmas newtonianos, el caos acabó de barrer la fantasía de Laplace de la predecibilidad determinista (*).

El determinismo inherente en el caos mostraría después que muchos fenómenos aleatorios son más predecibles que lo que se había pensado.

Es cierto también, que la naturaleza puede usar el caos de manera constructiva. La evolución biológica necesita de la variabilidad genética: el caos proporciona un medio de estructurar los cambios al azar, haciendo así posible que la variabilidad esté bajo el control evolutivo (|7|, p. 29).

Debe tenerse en cuenta, por otra parte, que en los procesos biológicos, y a causa de la ausencia de significación fisiológica del caos, éste en general no interviene más que como manifestación patológica ( fibrilación cardíaca, agregación aperiódica de las amebas, ... ), afectando a sistemas cuyo régimen normal es perió-

(*) La otra gran causa del hundimiento del determinismo de Laplace, fué la mecánica cuántica, con el principio de incertidumbre de Heisenberg como dogma central.

dico ( piénsese que es raro en biología que un régimen fisiológicamente estacionario degenere en un caos ).

De todos modos, la dinámica caótica no sólo es en la actualidad un área vital de la matemática aplicada, sino que está acusando implicaciones cada vez más crecientes en las ciencias biológicas. Muchos son los ejemplos de actividad caótica que se investigan actualmente, como son, entre otros, el metabolismo celular, la electrofisiología cardíaca, biología de poblaciones, osciladores electrónicos y sistemas láser.

También hay que decir que existe una variedad de situaciones productoras de caos (*), cuya complejidad se acrecenta al aumentar la dimensión del espacio de referencia, debiendo asímismo ponderarse que los movimientos se hacen extremadamente complicados y aleatorios cuando hay muchos grados de libertad en los sistemas ( por grado de libertad se entiende cada una de las variables necesarias para la descripción de un sistema ).

Con esto queremos dar a entender que, si bien hoy se reconoce unánimente que el caos constituye un modo básico subyacente en casi todos los fenómenos naturales cuyo estudio ha logrado dar explicación a una gran parte de problemas que había pendientes, aún quedan numerosas situaciones en la naturaleza que siguen siendo incomprendidas y para las que el hecho de que se determine que en ellas gravita un sistema caótico no aclara demasiado.

Cada día que pasa, el científico adquiere una mayor convicción de que, en su lucha por conseguir una descripción matemática del universo, quedarán siempre cosas que están fuera de la capacidad

---

(*) El más simple ejemplo no trivial que exhibe una plena variedad de comportamiento caótico, es el oscilador no lineal forzado.

de una inteligencia humana.

Y quizás acabe por recitarse a sí mismo unas frases cuyo significado distaría bien poco del que refleja las siguientes que dejó escritas Albert Einstein:

*La mente humana no es capaz de comprender el Universo. Somos como un niño que entra en una enorme biblioteca. Las paredes están cubiertas hasta los techos de libros escritos en muchas lenguas distintas. El niño sabe que alguien debe haber escrito estos libros. No sabe quién ni cómo. No comprende las lenguas en que están escritos. Pero el niño percibe una especie de plan determinado en la ordenación de los libros, un orden misterioso que no comprende, sino que sólo sospecha oscuramente.*

BIBLIOGRAFIA


|1| APÉRY, R.; MANDELBROT, B.; THOM, R. y otros (1984), *Pensar la matemática* - Cuadernos Infimos 114, Tusquets Edit., Barcelona.

|2| ARNOLD, V.I. (1989), *Teoría de Catástrofes*, Edit. Alianza Universidad, Madrid.

|3| BAUER, W.R.; GRICK, F.H.C. and WHITE, J.H. (1980), Supercoiled DNA, *Scientific American*, 243, 118-133.

|4| BRAUN, M. (1978), *Differential Equations and their applications* (second ed.), Springer Verlag, New York.

|5| COSNARD, M. (1987), *Traitement Numérique des Attracteurs Etranges*, Edit. C. N. R. S., París.

|6| COSRIMS (1964), *The Mathematical Sciences ( A Collection of Essays )*, The M.I.T. Press, Massachusets.

|7| CRUTCHFIELD, J.P.; FARMER, J.D.; PACKARD, N.H. and SHAW, R.S. (1987, Febrero), Caos, *Investigación y Ciencia*, 16-29.

|8| EKELAND, I. (1977, Septiembre),La théorie des catastrophes, *La Recherche*, 81, 745-754.

|9| FISHER, R.A. (1930), *The genetical theory of natural selection*, Ed. Chapman and Hall.

|10| FITZHUGH, R. (1960), Thresholds and Plateaus in the Hodgkin -Huxley equations, *J. Gen. Physiol.*, 43, 867-896.

|11| GLEICK, JAMES (1988), *Caos ( La creación de una ciencia )*, Edit. Seix Barral, Barcelona.

|12| GOLD, HARVEY J. (1977), *Mathematical Modeling of Biological Systems*, John Wiley & Sons. Inc., N. York.

|13| GOLDBERGER, A.L.; RIGNEY, D.R. and WEST, B.J. (1990), Caos y fractales en la fisiología humana, *Investigación y Ciencia* (Abril), 31-38.

|14| GOODWIN, B. (1973), Mathematical Metaphor in Development, *Nature* (Marzo).

|15| GUCKENHEIMER, J. (1978), The Catastrophe Controversy, *The Mathematical Intelligencer*, vol. I, nº 1, 15-20.

|16| HADELER, K.P. (1982), *Matemáticas para biólogos*, Edit. Reverté, Barcelona.

|17| HALDANE, J.B.S. (1930), A mathematical theory of natural and artificial selection, *Proc. Cambridge Phil. Soc. Math. Phys. Sci.*

|18| HAYEK, N. (1985), *Contribuciones de la matemática al desarrollo de la medicina*, Serv. Public. Universidad de La Laguna.

|19| HISTORIA GENERAL DE LAS CIENCIAS (1973, 1975), *La ciencia contemporánea*, tomos 3 (siglo XIX) y 5 (siglo XX), Edit. Destino, Barcelona.

|20| HODGKIN, A.L.;HUXLEY,A.F.(1952),A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve, *J. Physiol.*, 117, 500-544.

|21| JACQUARD, A. (1977), *Concepts en génétique des populations*, Ed. Masson, París.

|22| JACQUARD, A. (1974), *The genetic structure of populations*, Ed. Springer-Verlag.

|23| KERGOSIEN, Y.L. (1983), Medical exploration of some rythmic phenomena: A topological semiology, *Lectures Notes in Biomathematics*, 49, 32.

|24| KLINE, M. (1968), *Mathematics in the Modern World*, Edit. W.H. FREEMAN, San Francisco y London.

|25| LE LIONNAIS, F. (1962), *Las grandes corrientes del pensamiento matemático*, Edit. Eudeba, Buenos Aires.

|26| LOTKA, A.J. (1922), The stability of the normal age distribution, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, vol. 8, 339-345.

|27| LUCAS, WILLIAM F. (Editor)(1983), *Differential Equations Models*, Modules in Applied Mathematics, vol. 1, Springer-Verlag, New-York.

|28| LUCAS, WILLIAM F. (Editor) (1983), *Life Science Models*, Modules in Applied Mathematics, vol. 4, Springer- Verlag, New-York.

|29| MANDELBROT, BENOIT (1975,1984), *Los objetos fractales*, Tusquets Edit., Barcelona.

|30| POHL, W.F. (1980), DNA and Differential Geometry, *The Mathematical Intelligencer*, vol. 3 nº 1, 20-27.

|31| SAUNDERS, P.T. (1989), *Una introducción a la teoría de catástrofes*, Edit. Siglo XXI, Madrid (2ª edic.).

|32| SCHÜRGER, K.; TAUTU, P. (1976), A markovian configuration model for carcinogenesis, *Lectures Notes in Biomathematics*, vol. 11, 92-108, Springer-Verlag, Berlin-N. York.

|33| STEEN, L.A. (ed.)(1978),*Mathematics Today*, Springer,N.York.

|34| SUSSMANN, H.J. (1978), Catastrophe theory as applied to the social and biological sciences: A Critique, *Synthèse*.

|35| THOM, RENÉ (1972), *Stabilité Structurelle et Morphogenèse*, Ediscience, París.

|36| THOM, RENÉ (1974), *Modèles mathématiques de la morphogenèse*, Union Générale d'Editions, París.

|37| VOLTERRA, VITO (1931), *Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie*, Edit. Gauthier-Villars, París.

|38| WHITE, J.H. (1969), Self-linking and the Gauss integral in higher dimensions, *Amer. J. of Math.* 91, 693-728.

|39| WILLIAMS, T.; BJERKNES, R. (1972), Stochastic model for abnormal clone spread through epithelial basal layer, *Nature*, 236, 19-21.

|40| WOODCOCK, A. and DAVIS, M. (1986), *Teoría de las catástrofes*, Edit. Cátedra S.A., Madrid.

|41| ZEEMAN, E.C. (1976), Catastrophe Theory, *Scientific American* (Abril), 65-83.

# VIDA ACADEMICA

Las actividades de la Academia dieron comienzo con la solemne apertura del curso 1989-90, que tuvo lugar en el Salón de Actos de la Real Sociedad Económica de Amigos del País de Tenerife, amablemente cedido al efecto, el día 16 de Enero de 1990. El acto estuvo presidido por el Rector en funciones de la Universidad de La Laguna Dr. D. Federico Díaz Rodríguez, al que acompañaban el Presidente de la Academia Dr. D. Nácere Hayek, y Directores, Presidentes y Secretarios de otras corporaciones e instituciones culturales de ámbito regional. Tras la lectura por el Sr. Secretario de la Memoria preceptiva, el Académico Numerario Dr. D. Agustín Arévalo Medina pronunció el discurso de apertura que llevó por título " La Electroquímica, presente y futuro ", y cuyo texto aparece publicado en las páginas del presente volumen.

A lo largo del curso, la Academia ha celebrado varias reuniones, así como diversos actos culturales, bien por propia iniciativa o en colaboración con otras entidades. Más adelante se dá una breve reseña de los considerados como más destacados e importantes.

En la Junta General Extraordinaria celebrada el día 21 de Febrero de 1990, se acordó aceptar las propuestas presentadas para la designación como Académicos Electos ( formuladas cada una de ellas por cinco Académicos Numerarios, según establecen los vigentes Estatutos ), de los siguientes Señores: Dr. D. Alfredo Mederos Pérez y Dr. D. José Bretón Funes, por la Sección

de Química; Dr. D. Angel Gutiérrez Navarro, por la Sección de Biología; Dr. D. Carlos González Martín y Dr. D. Domingo Chinea Miranda, por la Sección de Matemáticas, y Dr. D. Manuel Vázquez Abeledo, por la Sección de Física. Su toma de posesión como Académicos Numerarios se llevará a efecto tras el preceptivo discurso de ingreso que habrán de pronunciar en las solemnes sesiones académicas en que se les hará entrega del título acreditativo.

En esa misma Junta, se propusieron también como Académicos Correspondientes a los Doctores D. Alejandro Jorge Arvía de la Universidad de La Plata ( Argentina ) y D. Antonio de Castro Brzezicki de la Universidad de Sevilla.

Cabe destacar las conferencias pronunciadas por el Académico de Número Dr. D. Wolfredo Wildpret de la Torre con el título " Algunas reflexiones sobre la teoría de la evolución: del Fijismo al Transformismo " y por el Académico Correspondiente Dr. D. Miguel Sánchez García bajo la denominación " Sistemas expertos: su influencia en los modelos de decisión ", en sendos actos celebrados los días 28 de Febrero y 12 de Junio de 1990; y la patrocinada por la Academia e impartida el 21 de Septiembre de 1990, por el Profesor Lê Dung Tráng de la Universidad de París VII y de la Escuela Politécnica de dicha capital, titulada " Aproximación algebraica a los sistemas diferenciales ".

Igualmente, la participación de la Academia en las VIII Jornadas Micológicas de Canarias ( Enero 1990 ) en colaboración con la Facultad de Biología, como asímismo en el ciclo de conferencias desarrollado por el Profesor Dr. Arnold F. Nikiforov, del M. V. Keldish Institute of Applied Mathematics de la Acade-

mia de Ciencias de la U. R. S. S. ( 22 y 23 Mayo 1990 ), en colaboración con el Departamento de Análisis Matemático de la Universidad de La Laguna, y en el Congreso Iberoamericano de Electroquímica ( Julio 1990 ) en colaboración con el Departamento de Química Física de esta última Universidad.

Finalmente, hay que reseñar el fallo y la adjudicación del Premio anual de la Academia, correspondiente al año 1989 en la modalidad de Matemáticas, emitido por el Jurado nombrado al efecto, concediendo dicho premio al Dr. D. Jesús Ildefonso Díaz Díaz de la Universidad Complutense de Madrid por su trabajo " Desigualdades de tipo isoperimétrico para problemas de Plateau y de capilaridad ", elegido entre los varios presentados al concurso.

## NORMAS PARA LA REDACCION Y ENVIO DE ORIGINALES

1. GENERALES

1.1. La Revista de la Academia Canaria de Ciencias publica artículos de investigación que sean inéditos, sobre temas de Matemáticas, Física, Química y Biología. La Revista acepta también trabajos sobre " Historia y Filosofía de la Ciencia ", especialmente referidos a las materias citadas, si bien en esta Sección sólo aparecerá un máximo de dos trabajos en cada uno de los números que se publiquen.

1.2. Dado que la Revista utiliza el sistema offset de edición, empleando como original el que facilitan los autores, se aconseja a éstos el máximo cuidado en su confección, usando una máquina eléctrica con cinta plástica negra o cualquier sistema de tratamiento de texto con impresión láser, sobre papel blanco de buena calidad tamaño DIN A-4.

1.3. El texto de cada trabajo, redactado en español o en inglés ( o bien en cualquier otro idioma a juicio del Comité Editorial ), no deberá exceder de 16 páginas, aunque se recomienda una extensión de 6 á 10 páginas como promedio. El límite máximo para los destinados a la Sección de Historia y Filosofía de la Ciencia es el de 25 páginas. Se entienden, tanto en un caso como en el otro, incluídas Notas, Bibliografía y Tablas.

1.4. El envío de cualquier original ( cuyas hojas deberán ser numeradas con lápiz en el margen superior izquierdo ), ha de ir acompañado de una copia, y se dirigirá a:

Director-Editor Profesor N. Hayek
Revista de la Academia Canaria de Ciencias
Facultad de Matemáticas
Universidad de La Laguna
Tenerife, Islas Canarias (España)

2. PRESENTACION DEL TRABAJO

2.1. La caja o espacio ocupado por el texto en cada página, ha de tener unas dimensiones de 17 cm. de ancho por 25 cm. de largo, dejando márgenes de 2 cm. a cada lado y a 2 cm. del borde superior de la página.

2.2. Se escribirá a doble espacio entre líneas.

2.3. La página de introducción debe comenzarse a 5 cm. del borde superior de la misma y ha de incluir los siguientes datos: Título del trabajo ( en letras mayúsculas centrado ); Autor ( inicial del nombre y apellido del autor, y lo mismo caso de ser varios los autores ); Centro donde se ha realizado, con dirección postal; Abstract en inglés ( con una extensión máxima de 150 palabras ) y Resumen en español ( con tope de igual extensión ); Key words o Palabras clave.

2.4. El comienzo de los párrafos tendrá una sangría de cinco es-

pacios.

2.5. Los encabezamientos de cada sección ( INTRODUCCION, PARTE EXPERIMENTAL, RESULTADOS, DISCUSION, etc ... ) numerados correlativamente, serán escritos con letras MAYUSCULAS sin subrayado y centrados en el texto. Los encabezamientos de subapartados o subsecciones, numerados en la forma 1.1, 1.2, ...., 2.1, 2.2,.., se escribirán con letras minúsculas subrayadas al margen izquierdo.

2.6. Las notas o llamadas, escritas con letra más pequeña (*) y con un espacio entre líneas, figurarán a pié de página, precedidas de un indicativo, por ejemplo, (*), (**), etc ...

2.7. Las referencias bibliográficas, intercaladas en el texto, contendrán los nombres de sus autores seguidos de un corchete de la forma [ ], en el que figurará el número correspondiente de la Bibliografía; por ejemplo, G. CANTERO [23] ó sólo apellido, CANTERO [23]. A veces ( y esto se deja a criterio del autor ), el texto quizás requiera poner simplemente sólo el número de la bibliografía, o sea [23], sin citar autor.

2.8. Las Tablas han de numerarse con números romanos. Las figuras y dibujos ( en tinta china ) o fotografías ( en blanco y negro y papel brillante ) deberán ser numeradas consecutivamente y con números arábigos. Los Apéndices ( si los hay ), se incluirán al final del texto, antes de la Bibliografía.

2.9. BIBLIOGRAFIA: Toda la bibliografía debe ser escrita por orden alfabético de apellidos ( por ejemplo, DAVIS, E.G.; GONZALEZ, E. y PEREZ, J.; MANRIQUE, S.; ..... ). Las referencias bibliográficas de artículos deberán contener: autor ( en mayúsculas ), año de publicación, revista, volumen y páginas; po ejemplo, WATSON, G.N. (1948), J. Diff. Geom., 3, 141-149. En el caso de libros ha de incluirse: autor ( en mayúsculas ), año de publicación, título ( a ser posible, en cursivas o itálicas ), editorial y lugar de publicación; por ejemplo, ELLIS, A.J. and MAHON, W.A.J. (1977), *Chemistry and Geothermal Systems*, Academic Press, London.

2.10. AGRADECIMIENTOS: centrado y texto a un espacio.

2.11. Se recomienda a los autores que tengan en cuenta los Reglamentos Internacionales de Nomenclatura para cada materia de las citadas en el apartado 1.1, así como los usos internacionales referentes a símbolos, unidades y abreviaturas.

3. NOTAS FINALES

3.1. Los artículos serán sometidos a estudio por el Comité Editorial el cual, asesorado por expertos, decidirá si procede o nó su publicación, o bien propondrá a los autores que hagan las

---

(*) Por ejemplo, Courier de paso 12.

modificaciones convenientes.

3.2. Por cada trabajo publicado, se entregarán al autor o autores, un total de 30 separatas.

3.3. El texto, incluídas figuras, tablas, diagramas, etc ..., de un trabajo publicado en la RACC no podrá ser reproducido sin permiso de la Academia Canaria de Ciencias.

Nácere Hayek

Director-Editor

# REVISTA DE LA ACADEMIA CANARIA DE CIENCIAS

**Folia Canariensis Academiae Scientiarum**

Volumen II (1990)


## INDICE


Págs.

PRESENTACION . . . . . 5

*SECCION QUIMICA*

J. MORALES, M. C. AREVALO y A. AREVALO - Coeficientes de actividad de disoluciones acuosas de $ZnSO_4$ por Medidas de F.E.M. . . . . 9

J. MORALES, P. ESPARZA y A. AREVALO - Potencial de unión líquida entre dos diferentes electrolitos univalentes, con un ión común, a la misma concentración . . 15

ARGELIO GONZALEZ, VICENTE OJEDA y VENERANDO GONZALEZ - El 2-(4',5'-Difenil-2'-Imidazolilazo)-4-Clorofenol como reactivo cromogénico e indicador metalocrómico para cobre (II) . . . . . 23

BENITO RODRIGUEZ RIOS, ALFREDO MEDEROS, PEDRO GILI, FRANCISCO GONZALEZ REGALADO Y ANTONIO I. HERNANDEZ HERNANDEZ - Efectos químicos de la descarga de alta frecuencia. Síntesis y caracterización de un nuevo orto periodato de cobre (II) . . . . . 33

*SECCION BIOLOGIA*

F. GARCIA TALAVERA - Aves gigantes en el mioceno de Famara (Lanzarote) . . . . . 71

JUAN JOSE HERNANDEZ PACHECO - Los staphylinoidea (coleóptera) subterráneos de Canarias: consideraciones zoogeográficas . . . . . 81

J. J. BACALLADO y J. J. HERNANDEZ - Thaumetopoea herculeana Rambur, 1840 (Lepidóptera-Thaumetopoeidae) nueva especie para la fauna de Canarias . . . . . 93

JESUS ORTEA - El Género Geitodoris Bergh, 1891 (Mollusca: Nudibranchia) en las Islas Canarias . . . . . 99

O. RODRIGUEZ, W. WILDPRET, M. J. DEL ARCO y P. L. PEREZ - Contribución al estudio fitosociológico de los restos de Sabinares y otras termófilas de la Isla de Tenerife (Canarias) . . . . . 121

Págs.

OCTAVIO RODRIGUEZ - Contribución al estudio climático y bioclimático del SE de la isla de Tenerife: la comarca de Agache (Güimar) . . . . . 143

*SECCION HISTORIA Y FILOSOFIA DE LA CIENCIA*

AGUSTIN AREVALO MEDINA - La Electroquímica, presente y futuro . . . . . 171

NACERE HAYEK - Matemática y Biología . . . . . 191

*VIDA ACADEMICA* . . . . . 239

NORMAS PARA LA REDACCION Y ENVIO DE ORIGINALES . . . 245

# INDICE

Págs.

PRESENTACION ..... 5

*SECCION QUIMICA*

J. MORALES, M. C. AREVALO y A. AREVALO. Coeficientes de actividad de disoluciones acuosas de $ZnSO_4$ por Medidas de F.E.M. 9

J. MORALES, P. ESPARZA y A. AREVALO. Potencial de unión líquida entre dos diferentes electrolitos univalentes, con un ión común, a la misma concentración ..... 15

ARGELIO GONZALEZ, VICENTE OJEDA y VENERANDO GONZALEZ. El 2-(4',5'-Difenil-2'-Imidazolilazo)-4-Clorofenol como reactivo cromogénico e indicador metalocrómico para cobre (II) ..... 23

BENITO RODRIGUEZ RIOS, ALFREDO MEDEROS, PEDRO GILI, FRANCISCO GONZALEZ REGALADO y ANTONIO I. HERNANDEZ HERNANDEZ. Efectos químicos de la descarga de alta frecuencia. Síntesis y caracterización de un nuevo orto periodato de cobre (II) ..... 33

*SECCION BIOLOGIA*

F. GARCIA TALAVERA. Aves gigantes en el mioceno de Famara (Lanzarote) ..... 71

JUAN JOSE HERNANDEZ PACHECO. Los staphylinoidea (coleóptera) subterráneos de Canarias: consideraciones zoogeográficas ..... 81

J. J. BACALLADO y J. J. HERNANDEZ. Thaumetopoea herculeana Rambur, 1840 (Lepidóptera-Thaumetopoeidae) nueva especie para la fauna de Canarias ..... 93

JESUS ORTEA. El Género Geitodoris Bergh, 1891 (Mollusca: Nudibranchia) en las Islas Canarias ..... 99

O. RODRIGUEZ, W. WILDPRET, M. J. DEL ARCO y P. L. PEREZ. Contribución al estudio fitosociológico de los restos de Sabinares y otras termófilas de la Isla de Tenerife (Canarias) ..... 121

OCTAVIO RODRIGUEZ. Contribución al estudio climático y bioclimático del SE de la isla de Tenerife: la comarca de Agache (Güimar) 143

*SECCION HISTORIA Y FILOSOFIA DE LA CIENCIA*

AGUSTIN AREVALO MEDINA. La electroquímica, presente y futuro ..... 171

NACERE HAYEK. Matemática y Biología ..... 191

*VIDA ACADEMICA* ..... 239

NORMAS PARA LA REDACCION Y ENVIO DE ORIGINALES 245