

## Geoquímica aplicada al medio ambiente

Manuel VILADEVALL SOLÉ, Ramon VAQUER NAVARRO y David PÉREZ GUERRERO.

Dep. Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Universidad de Barcelona.

Zona Universitaria de Pedralbes. Barcelona 08071. Fax: 34-3-4023040

### RESUMEN

En este trabajo se pretende determinar las distintas acciones que los elementos químicos que definen el "paisaje", ejercen sobre el medio ambiente. Dichas acciones, denominadas positivas o negativas, bajo la óptica humana, se deben a al comportamiento físico-químico de los elementos, a su interacción con el medio natural y al uso final que de estos elementos da el hombre.

Se presentan así mismo los distintos métodos y técnicas que se aplican en la exploración geoquímica, con el fin de examinar las diferentes opciones que estos nos aportan sobre el objeto ya definido. Como objetivo último, este trabajo pretende definir a la "Geoquímica aplicada al medio ambiente" como la interacción entre la Prospección geoquímica, la Geoepidemiología y la Geoquímica ambiental

Por todo ello, se presentan cinco ejemplos, en zonas próximas a la Ciudad de Barcelona y en la Isla de Menorca.

*Palabras Clave:* Paisaje geoquímico, medio ambiente, geoquímica aplicada.

### ABSTRACT

In this work it is intended to determinate the different effects that the chemical elements defining the "landscape geochemistry" produce in the environment. These effects, thought to be positive or negative under human perspective, are due to the physico-chemical behaviour of the element, to their interaction with the environment and the final use of these elements by the man.

The different methods and techniques applied in geochemical prospecting are presented in order to examine the varied options determined on the defined object. As last target, this work deals with placing the enviromental applied geochemistry as an geochemical prospecting and geoepidemiology and enviromental geochemistry interaction.

Five examples in zones near Barcelona and the isle of Menorca are presented.

*Keywords:* landscape geochemistry, environment, environmental geochemistry.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los hechos y sus efectos, que consideramos atentatorios sobre el medio ambiente o entorno que nos rodea y que denominamos contaminación (en el sentido de alteración de la pureza del medio ambiente por medio de sustancias capaces de perjudicar la salud de las especies), no siempre son acciones imputables al hombre, sino que pueden ser genéricas del propio medio natural. En ambos casos sus consecuencias, tanto bajo el punto de vista patológico para la flora y la fauna como estéticos-paisajísticos para los humanos, pueden llegar a ser consideradas como nocivas .

El origen de los hechos imputables al hombre, se sitúan de forma genérica en el marco de su actividad industrial, agropecuaria, servicios y en el de su uso final. Las acciones que se producen, de las cuales se hacen eco con mayor o menor intensidad los distintos gobiernos, medios de comunicación y organizaciones locales e internacionales, presentan distintos alcances. Estas van desde una escala local ( fábrica, municipio, etc.), regional (comunidad, país, etc.), a una escala global como los bien conocidos efectos invernadero, capa de ozono, etc.

Los agentes de estas acciones son múltiples, siendo quizás los mas relevantes por su causa efecto, los elementos y compuestos químicos. Entre estos elementos y sus compuestos asociados, los más conocidos entre los

inorgánicos son el As, B, Cd, Cr, Fe, Cu, Pb, Mn, Hg, Ni, Mo, Se, U, . ( Purves, 1985; Adriano, 1986; Kabata-Pendias and Pendias, 1989)

Es poco conocido que los elementos químicos, como por ejemplo los anteriormente mencionados, por ser habituales dentro del ciclo geoquímico, forman parte del entorno natural y en consecuencia dar lugar a zonas enriquecidas por procesos endógenos o exógenos de alcance local o regional. Estas zonas se denominan anomalías geoquímicas o contaminación natural.

Su importancia, lo puede demostrar el hecho, de que la toxicidad de todos los metales liberados de forma natural, anualmente al medio, por los procesos indicados, supera a la resultante de la contaminación de todos los residuos orgánicos y radioactivos (Nriagu 1988; Nriagu i Pacina, 1988). La medida se obtiene a partir de la cantidad de agua necesaria para diluir estos residuos hasta llegar a los estándares de la calidad del agua de uso doméstico.

El contacto del hombre con estos elementos, son principalmente de tipo ocupacional o profesional (radiación, asbestosis, etc.). No obstante la extensa difusión de muchos de estos elementos, hace que no tan sólo se hallen expuesto a éstos los humanos, sino que por medio del aire, el agua, el suelo o la cadena trófica toda la flora y la fauna.

Tabla 1.- Contenidos de selenio en sangre. Jackson, 1986. KD(+) cardiopatías en niños de 1 a 10 años; KD(-) cardiopatías ausentes. ( El selenio es inadecuado para la predicción).

Table 1.- The blood selenium content after Jackson, 1986. KD(+) heard diseases in children 1 to 10 years old. KD(-) heard diseases absent. (Selenium is inappropriate for prediction).

Localidad	Media $\text{ngcm}^{-3}$	Rango $\text{ngcm}^{-3}$	n	Referencias
China rural (KD+)	17	8-26	274	Li and Jakson (1985)
	(KD-)	47	32-83	136
China, urbana tóxico	174	102-255	87	Li and Jakson (1985)
	3.000	700-7800	9	Li and Jakson (1985)
E.U.A., urbana South Dakota	206	100-340	210	Li and Jakson (1985)
	256	140-600	50	Howe (1979)
Finlandia	70	63-76	256	Salonen et al (1982)
Nueva Zelanda (Sur)	68	56-84	215	Griffiths & Thomson 1974
Nueva Zelanda (Norte)	69	50-100	24	Watkinson (1974)
Canadá	180	100-350	250	Watkinson (1974)

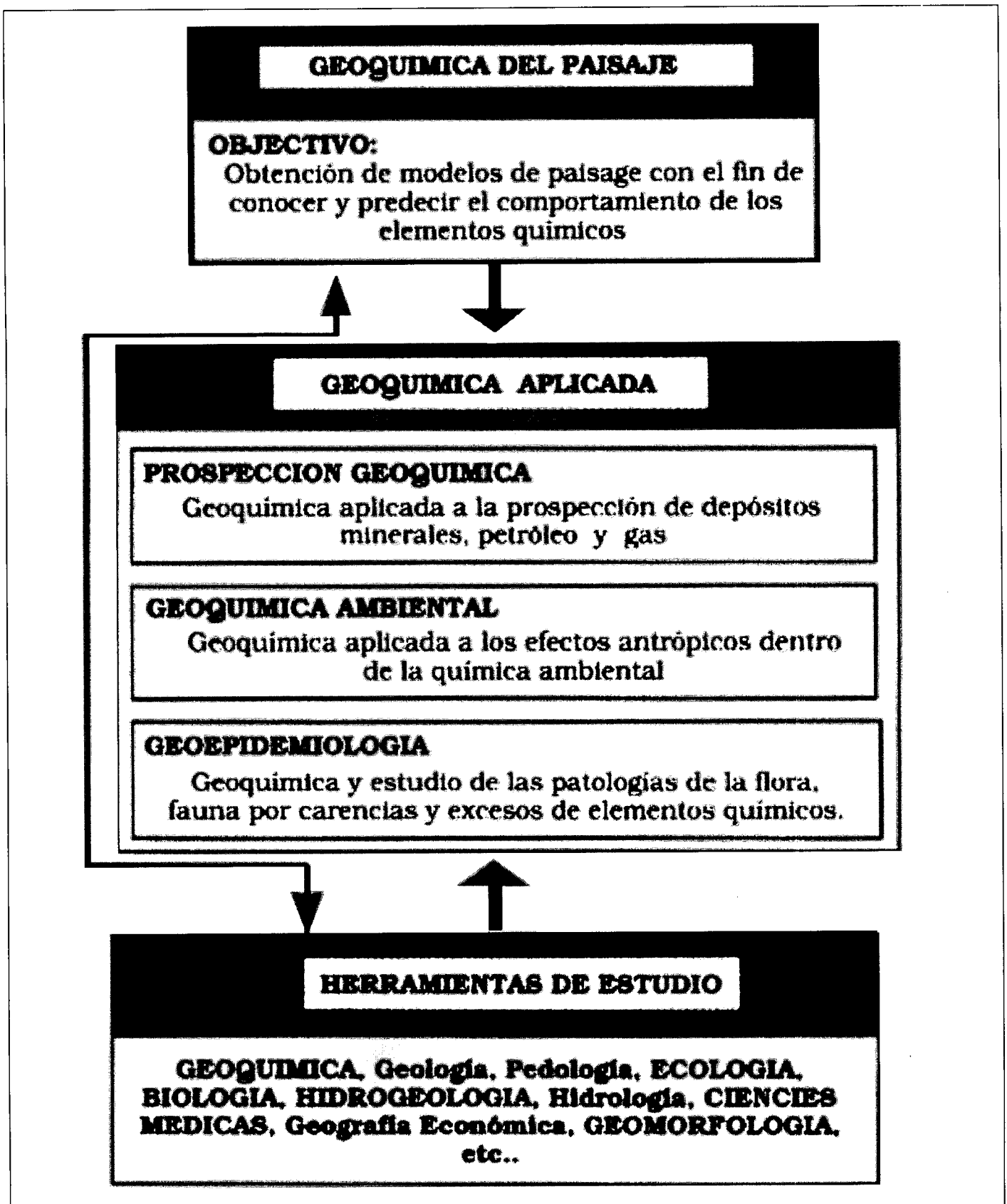


Figura 1.- Diagrama inspirado en Fortescue (1980)

Figure 1.- Diagram inspired in Fortescue (1980)

Los metales pesados, aspecto que nos ocupará principalmente en este trabajo, presentan pues una amplia abanico de efectos tóxicos, algunos de ellos de manera no inmediata sino a largo plazo. La exposición crónica a algunos de estos elementos no supone tan sólo un riesgo cancerígeno, sino tan diversos como enfermedades de tipo neurológico, hepáticas, renales, hemopoiéticas, así como potenciales efectos mutagénicos y teratogénicos (Hall et al., 1994).

No tan sólo el exceso en algunos elementos químicos dan lugar a patologías peligrosas, sino que su carencias o ausencia, sean de origen natural o antrópico (cultivos extensivos), también pueden dar toda una batería de enfermedades como por ejemplo el Iodo y sus efectos sobre las tiroides, la falta de selenio (tabla 1) en forma de car-

diopatías o el Zn y Mo en forma de cáncer de estómago (Jackson, 1986 y Jackson et al., 1986).

En ambos casos (presencia o ausencia de un elemento determinado en el entorno), al ser desconocidos sus efectos sobre los seres vivos ( gran parte de los elementos químicos como la tierras raras) o poco conocidos, éstos pueden dar lugar a patologías endémicas, atribuibles muchas veces a orígenes inciertos. Todo ello origina, por una parte, grandes dispendios en términos sanitarios a corto plazo que pueden ser mucho más elevados, a medio y largo plazo debido al crecimiento de la esperanza de vida de la población. Por otra parte, producen grandes perjuicios económicos, al afectar a la flora y fauna y en su conjunto a la industria agropecuaria.

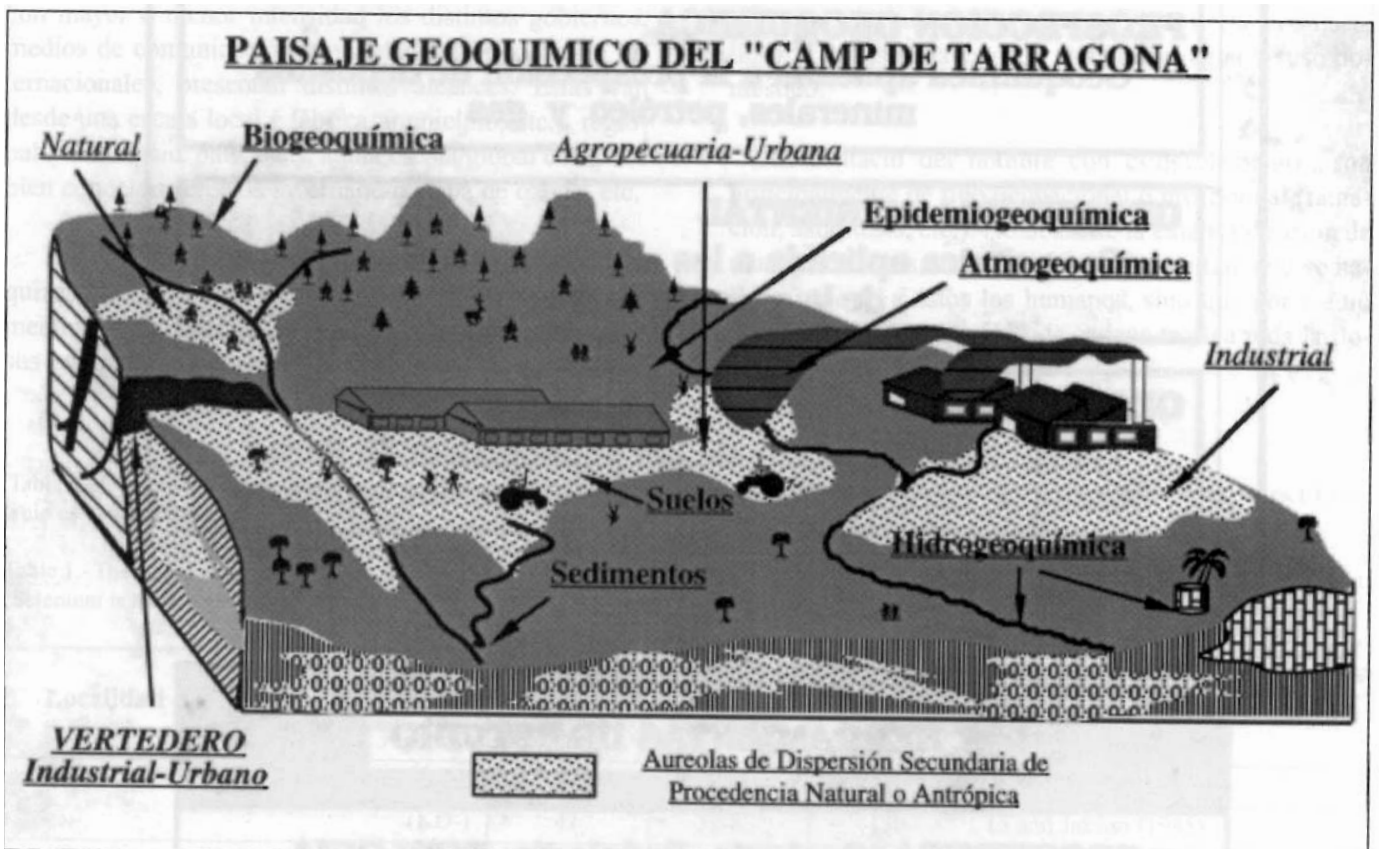


Figura 2.- Ejemplo de "Paisaje Geoquímico" que ilustra la interacción entre ambientes geoquímicos y procesos naturales y antrópicos en un sector de gran complejidad medioambiental por la presencia de suelo urbano y zonas industrial, agrícola y de ocio. Nótese que las características geoquímicas de la litosfera condicionan las de hidrosfera, biosfera, atmósfera y pedósfera y que todas ellas son modificadas por la acción antrópica.

Figure 2.- Example of "Geochemical Landscape" showing interactions between geochemical media and natural and anthropic processes in a very complex environmental sector where urban, industry, farming and leisure human activities coexist. Note that the geochemical characteristics of hydrosphere, biosphere, atmosphere and pedosphere are conditioned by those of litosphere and that all are modified by anthropic action.

La mejor manera de definir, ubicar y gestionar los diferentes elementos químicos en el entorno, así como el determinar si su procedencia es natural o antrópica, es a partir del paisaje geoquímico.

## 2. GEOQUÍMICA DEL PAISAJE

La geoquímica puede definirse (Goldschmidt, 1954 y Fortescue, 1979; 1980; 1992), como el papel que realizan los elementos químicos en la síntesis y descomposición de los materiales naturales en todos sus aspectos. La geoquímica ambiental sería la parte de la geoquímica que no tan solo sintetizaría el papel sobre los materiales naturales y sus consecuencias sobre el ambiente, sino también los efectos y sus consecuencias que los elementos químicos de origen antrópico, darían lugar sobre el entorno. Este papel, de manera general puede sintetizarse de forma gráfica en el denominado "Paisaje Geoquímico" (Fig.1 y Fig.2), cuyo objeto tendría como finalidad, la de obtener modelos matemáticos para determinar, si los elementos químicos que actúan sobre éste, son de origen natural o antrópico, predecir su comportamiento y en su caso sus efectos o consecuencias, y diseñar las medidas correctoras apropiadas.

Las herramientas que se utilizan para esquematizar este paisaje, son multidisciplinarias ya que éste, es el resultado de la interacción de los diferentes ambientes geoquímicos que se ubican en la Tierra, tales como en la Litósfera, Hidrosfera, Biosfera, Atmósfera y Pedósfera o suelos.

De manera parcial y con el fin de alcanzar el objetivo propuesto, éste lo podemos subdividirlo, en diversos sub-objetivos, cada uno de los cuales podrá ser independiente en cuanto a su fin pero interdependientes para el objetivo definido.

Estos aspectos parciales que se pueden globalizar como una amplia disciplina, es la geoquímica aplicada. Entre estas, la más clásica es la Prospección geoquímica que presenta como objetivo, la localización de anomalías con fines económico-mineros y no por menos clásica o menos conocida, la Geoepidemiología que trataría de la incidencia de la geoquímica sobre los seres vivos, en forma de patologías.

Por último la geoquímica ambiental (fig.1), definida por Fortescue (1980) como la geoquímica aplicada a los efectos antrópicos o policía ambiental, debería ampliar sus objetivos englobando a la Prospección Geoquímica y

a la Geoepidemiología y definirse como "Geoquímica aplicada al medio ambiente".

## 3. GEOQUÍMICA APLICADA AL MEDIO AMBIENTE.

En función de la escala de análisis, los elementos químicos presentarán un efecto diferencial en su comportamiento. Estas escalas son las bases de la geoquímica aplicada que a su vez tiene en los principios geoquímicos su fundamento .

Estos principios nos indican que las anomalías litoféricas en elementos químicos naturales, como objeto geoquímico, han tenido su origen a partir de los mecanismos de diseminación o dispersión y de concentración de sus fuentes primarias. A cada fenómeno concentrador, le corresponde un efecto diseminador y viceversa, lo que permite mantener un balance geoquímico a escala global.

Mientras en los procesos naturales sean de origen endógeno o exógeno el balance geoquímico puede en algunos casos ser determinado a escala local (efectos producidos por la concentración de sulfuros metálicos), a nivel antrópico, debido a la internacionalización del comercio de las materias primas, este balance tan sólo puede realizarse a nivel global. Así por ejemplo, el mercurio extraído en Almadén sus efectos sobre el paisaje podrán ser cuantificados en una amplia diversidad de paisajes geoquímicos como el de la selva amazónica o en el cinturón industrial de los Grandes Lagos de EUA - Canadá, o bien el de un crudo extraído en Siberia o en la Península Arábiga en el Mediterráneo o en Japón.

### 3.1. Procesos geoquímicos

Todos los procesos de origen natural que tienen lugar en la corteza terrestre se pueden clasificar en dos grandes tipos: Procesos Primarios y Procesos Secundarios. Estos procesos que definen el "*paisaje geoquímico*", afectan al comportamiento y asociación de los elementos.

Los procesos Primarios, son los que tienen lugar en el ambiente de la litósfera por debajo del nivel de circulación de las aguas meteóricas, originados principalmente por los mecanismos de diferenciación magmática y por los procesos metamórficos que tienen lugar a grandes presiones y temperaturas (Beus y Grigorian, 1977). A los segmentos relativamente amplios de la corteza te-

restre en donde se sitúan dichos ambientes y en la que la composición química es significativamente diferente a la del “Clarke” (composición media de la corteza terrestre) y/o se caracterizan por la presencia de un cierto tipo de elemento, se le denominan “provincias geoquímicas”. Un ejemplo de Provincia Geoquímica la tenemos con el Cu, en la Cordillera Occidental Andina y el Sn y Sb en la Cordillera Oriental y Altiplano andino (Viladevall, 1993). A nivel de provincias más reducidas (escala regional), un ejemplo lo tendríamos en el caso del plomo, bario y flúor de las Cadenas Costeras Catalanas (Font, 1983).

Las zonas objeto de la Prospección geoquímica y que deberían ser además de la Geoepidemiología, son las aureolas de concentración de elementos químicos originadas como resultado de la dispersión primaria. La “dispersión primaria”, en un sentido estricto, es la distribución particular de los elementos en las rocas no meteorizadas que rodean a un cuerpo mineral, sin tener en cuenta cómo o dónde se formó el cuerpo (Levison, 1980). Y en un sentido amplio, la dispersión primaria describe la distribución particular de los elementos en las rocas no meteorizadas.

Según esto, la dispersión primaria se manifiesta como:

- Aureolas geoquímicas de elementos ( pueden tener lugar durante los procesos magmáticos).
- Alteraciones, de origen hidrotermal en la roca encajante de estas mineralizaciones (se excluye la alteración meteórica).
- En general como una distribución particular de los elementos en las rocas no meteorizadas.

La dispersión primaria, por su propia definición, se contraponen a la denominada dispersión secundaria, referida ésta a la dispersión supergénica de los elementos que en origen se hallaban concentrados en zonas anómalas (Font, 1983 op. citada) y en las aureolas geoquímicas primarias a ellas asociados. La dispersión secundaria da lugar a las aureolas de dispersión secundaria reflejándose en los cuatro ambientes geoquímicos indicados anteriormente.

El origen de estas aureolas, se halla relacionada con el flujo de los distintos fluidos en diferentes condiciones físico-químicas, que permiten que los elementos químicos, en función de su solubilidad y actividad, así como por el pH y Eh del medio y fugacidad del oxígeno y azufre, depositarse de forma geométrica más uniforme que la mineralización propiamente dicha.

Los materiales y las rocas que son estables dentro de los ambientes primarios, son con cierta frecuencia inestables dentro de los denominados ambientes secundarios. Estos, se hallan afectados por una serie de procesos físicos y químicos denominados de “alteración”, siendo los primeros la desintegración o disgregación sin cambios mineralógicos y los segundos la hidrólisis y la oxidación. Los elementos en estos ambientes son liberados al suelo, a las aguas y a la atmósfera, dando lugar a las aureolas que, por regla general, son más extensas que las aureolas primarias y de aquí su utilidad en la prospección minera para localizar anomalías originadas por efectos antrópicos.

La alteración química, a diferencia de la física, implica rotura por medios químicos de los minerales y rocas así como la dispersión de los elementos liberados, generalmente por el agua, a distancias considerables del área fuente. Para que todo ello suceda, se necesitan grandes cantidades de oxígeno, CO<sub>2</sub> y agua así como ingentes cantidades de bacterias, que pueden ser el origen, bien de la oxidación, bien de la reducción de ciertos elementos.

Los productos de la alteración en función de pH y Eh (Levison 1980), se hallan formados por constituyentes solubles, insolubles, y residuales.

- Compuestos solubles tales como cloruros.
- Compuestos insolubles como óxidos de Fe y Mn, arcillas, sulfatos, carbonatos, cloruros (querargirita), silicatos y metales nativos (Hg, Ag)
- Minerales primarios residuales como óxidos (casiterita, rutilo, cromita...), nativos (Au, Pt, diamantes etc.), silicatos (berilo, circón, etc.) y otros como algunos sulfatos (monacita).

Otros factores que dan lugar y que regulan los Ambientes Secundarios, en general son:

- Factores Geológicos: tales como la composición del material rocoso y mineral, estructura, textura, porosidad y permeabilidad. Estos serán fundamentales para la liberación, removilización y precipitación de los elementos.
- Factores Topográficos: como el relieve que da lugar: al control de la tasa de escorrentía y en consecuencia a la humedad necesaria para las reacciones químicas, al control de la tasa de los movimientos de las aguas freáticas y por lo tanto la removilización de los productos solubles, así como el control de la tasa de erosión de los productos alterados (suelos) y en con-

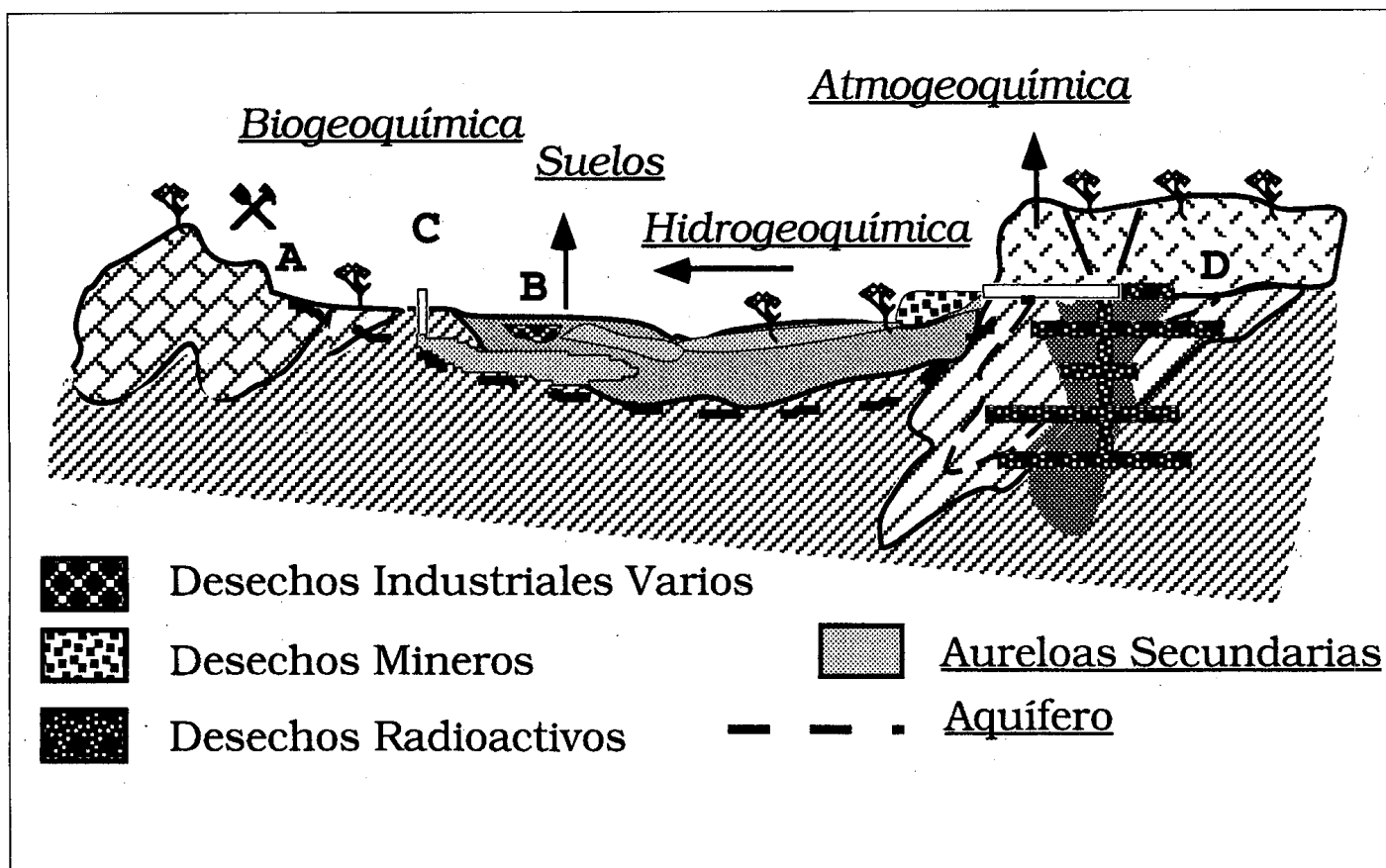


Figura 3.- Modelo intuitivo de localización de aureolas secundarias originadas por acciones naturales y antrópicas.

Figure 3.- Intuitive model of the geochemistry secondary haloes generated by natural or antropic actions.

secuencia la tasa de exposición de las aguas superficiales.

- Factores Climáticos: como las precipitaciones, el viento y los cambios de temperatura y en consecuencia, de la humedad. El clima afectará principalmente a la naturaleza del medio tal como las aguas superficiales y subterráneas, los sedimentos en redes de drenaje, suelos, vegetación etc., así como al mecanismo de transporte de los elementos y minerales ( mecánico, en solución, suspensión, coloides, etc.). La temperatura junto con la humedad será la causa de la variación de las distintas velocidades de reacción en los procesos de oxidación e hidrólisis.
- Factores Biológicos: estos vienen representados por la materia vegetal, capaz de removilizar ciertos elementos, modificar el medio y establecer criterios de removilización y precipitación. Algunas bacterias por su parte no tan solo afectan a los minerales, sino también al medio, acidificándolo y en consecuencia movilizar elementos. Algunas de ellas pueden reducir los sulfatos a sulfuros, provocando su precipitación.

### 3.2. Métodos de exploración

Los métodos de prospección geoquímica, bien sean para la localización de recursos minerales o energéticos o la de contaminantes químicos originados por procesos antrópicos, y sobre las bases de la geoquímica del paisaje los podemos clasificar en:

- a. LITOGEOQUÍMICOS;
- b. PEDOGEOQUÍMICOS o SUELOS;
- c. HIDROGEOQUÍMICOS;
- d. ATMOGEOQUÍMICOS;
- e. BIOGEOQUÍMICOS;

Sin descartar a ninguno de ellos, el desarrollo y aplicación de cada uno de los diferentes métodos, consistirá en: un muestreo, un análisis y una interpretación de los datos.

Todo desarrollo, deberán ser optimizado dentro de una fase previa que se denomina "Prospección Orientativa" en exploración minera y que denominaremos "exploración orientativa", en el campo de la geoquímica ambiental.

En cualquier exploración geoquímica ambiental, y fundamentalmente en la fase orientativa, lo primero que hay que determinar, antes de aplicar cualquiera de los métodos indicados, es de que tipo de objeto geoquímico se trata; cuál es su disposición en el espacio y en el tiempo y cuál podría ser la estructura del foco contaminante. A partir de estos parámetros cabría la posibilidad de determinar las estructuras de las aureolas de dispersión primaria y/o secundaria y su posibles alcances.

El tipo de objeto geoquímico, si es de origen natural (endógeno o exógeno), podrá ser determinado a partir de la asociación de los distintos elementos químicos que la componen. Algunos de ellos, denominados indicadores, en función de su movilidad (pH y Eh del medio), podrán ser detectados fácilmente. Entre ellos resaltar el Cl, S, I, Br, Mo, U, Se, F, Zn, Cu, Co por citar algunos.

Cuando el tipo de objeto geoquímico es de origen antrópico, la posible asociación de elementos así como sus indicadores, tan sólo puede, antes de la exploración geoquímica, pronosticarse a partir de los procesos industriales de producción ( activadores y depresores en una industria extractiva).

En varios ejemplos, veremos la disposición de los cuerpos geoquímicamente anómalos dentro de un paisaje geoquímico, que se reflejan en la Fig. 3. En primer lugar, tenemos un objeto geológico de tipo **A**, que lo consideramos como un yacimiento o cuerpo aflorante (cantera de áridos). En el, se detectan además del impacto visual propiamente dicho, distintas aureolas de dispersión secundarias en superficie originadas en alguno casos por la oxidación de los sulfuros que normalmente contienen; aureolas producidas por los combustibles y en función de la dirección de los vientos y aureolas de materiales propios de la explotación en terrenos ajenos por citar algunas. Su detección podría realizarse con cualquiera de los métodos indicados.

Un segundo tipo **B** o subaflorante sería el de la ubicación de un vertido industrial o urbano en una antigua explotación de áridos aluviales, oculto por un pequeño recubrimiento de materiales alóctonos o autóctonos. En este caso las aureolas de dispersión secundaria afectarían al acuífero superficial y su detección sería mediante hidrogeoquímica, sedimentos en redes de drenaje y biogeo-

química. Los suelos o pedogeoquímica como complemento de la biogeoquímica.

Un tercer tipo **C**, sería el de un objeto profundo y parcialmente ciego por un recubrimiento autóctono. Podría tratarse de un vertido industrial en un pozo profundo y tan sólo afectaría a un acuífero profundo. En este caso solo la hidrogeoquímica del acuífero detectaría la aureola de dispersión secundaria o una vegetación con raíces muy profundas. Los otros métodos, a excepción de la atmogeoquímica si existen emisión de gases, no permitirían detectarlo.

Por último, el de tipo **D**, completamente ciego, en el ejemplo de la fig. 3, una antigua mina seca recubierta por una cobertera discordante. En este caso tan sólo la hidrogeoquímica y en condiciones muy favorables (prolongado período de lluvias), permitiría desarrollar aureolas de dispersión secundaria y en consecuencia detectarlas. Al igual que en el tipo **C**, la presencia de gases permitiría detectar las aureolas a partir de fracturas superficiales.

Para un mejor resultado en la detección de las posibles aureolas de dispersión, deberán complementarse varios métodos geoquímicos así como con métodos geofísicos ( directos o indirectos).

### 3.2.1. Criterios de selección de los distintos métodos.

Si tomamos las Figs. 2 y 3. como referencia, hay que resaltar en primer lugar, la posición en el espacio del objeto geoquímico y en segundo lugar los elementos que pueden dar lugar a cualquier tipo de disfunción en el entorno, con respecto a los de origen no antrópico.

En función de todo ello y según la escala de trabajo los métodos a emplear son:

**A).** Reconocimiento global de un territorio de gran extensión ( superior a 50 km<sup>2</sup> ).

*A1: Sedimentos en redes de drenaje.*

Estos representan la interacción de todos los ambientes geoquímicos que caracterizan el *paisaje* . Los sedimentos son el reflejo, a partir de las aureolas de dispersión secundaria, de la erosión física de las rocas tanto alteradas como no alteradas, de los suelos y de la vegetación. Estos junto con el agua, hielo y viento, transportan y depositan los elementos pesados en zonas propicias, según parámetros físicos (equivalencia hidráulica), o químicos (adsor-



ción, absorción y/o precipitación). En consecuencia, éstos también detectarán emisiones antrópicas que afecten al entorno, sean industriales, urbanos u agropecuarios, por los mismos procesos indicados anteriormente.

#### *A2: Hidrogeoquímica de aguas superficiales.*

Al igual que el anterior refleja, mediante la acción del agua por procesos principalmente químicos (disolución), pero también físicos y a través de sus respectivas aureolas, los distintos ambientes geoquímicos (Salomons and Förstner, 1984). Ambos métodos pueden ser complementarios en función de los objetivos que se deseen alcanzar y su muestreo es de tipo dicotómico.

Mientras la hidrogeoquímica es un método más directo para el reconocimiento de la hidrosfera como ambiente, así como de los efectos antrópicos que se ejercen sobre esta, los sedimentos reflejan un espectro mucho más amplio pero menos concreto.

#### *A3: Atmogequímica.*

Si bien este método se emplea principalmente para el reconocimiento de zonas a escala local, la presencia de anomalías geoquímicas de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, F, NO<sub>x</sub>,... en extensas regiones del planeta, debido a emisiones industriales y a fenómenos volcánicos, sus mediciones pueden realizarse mediante sensores físicos o fisico-químicos, en puntos dispersos del globo.

**B).** Reconocimiento de las anomalías detectadas a partir de los métodos anteriores en áreas inferiores a los 50 km<sup>2</sup>.

#### *B1. Hidrogeoquímica de aguas superficiales y subterráneas.*

Método directo para determinar los distintos parámetros de alterabilidad de las aguas superficiales y subterráneas por procesos naturales u antrópicos y detectar el origen de la anomalía ( todos los tipos de la fig. 3).

#### *B2. Suelos.*

Estos caracterizan los cuatro ambientes geoquímicos que configuran el *paisaje geoquímico*, y son el reflejo de la acción puntual de la litosfera o de los vertidos industriales y agropecuarios ( abonos, pesticidas, herbicidas, etc.). Así mismo también lo son de la vegetación y de los gases, tanto endógenos como exógenos (contaminación atmosférica), que a través de la vegetación o de forma directa, afectan a los suelos.

#### *B3. Biogeoquímica.*

Esta, al igual que los suelos, caracteriza la totalidad de los ambientes geoquímicos y da carácter a los suelos (principalmente al horizonte superficial), participando de forma activa en la configuración del paisaje geoquímico.

Por sus características, ya que las raíces de algunas plantas pueden alcanzar elevadas profundidades, son susceptibles de lixiviar y solubilizar elementos poco solubles como metales preciosos y Tierras raras. Por ello, reflejan perfectamente el quimismo del substrato geológico y de los elementos que los encierran, como los vertidos industriales. La vegetación además del reflejo del substrato, es un excelente indicador medio ambiental, tanto atmosférico como hidrológico ya que al igual que el agua, actúa directamente sobre los seres vivos por la cadena trófica.

Por ello, es un método directo de exploración geoquímica, ya que de forma simultánea nos indica la presencia de elementos químicos y su posible influencia en la cadena trófica ( biodisponibilidad), siempre y cuando su comportamiento sea de no barrera, en el sentido que la planta sea susceptible de absorber los elementos del suelo (Kovalevskii, 1967).

Para determinar el efecto barrera de la vegetación, es necesario correlacionar los distintos elementos del suelo y del substrato rocoso, con los de la vegetación que en ellos se desarrolla (Viladevall, 1993).

#### *B4. Atmogequímica.*

A nivel local, dicho método, además de ser utilizado con el fin de detectar los gases anteriormente citados, puede usarse para determinar y/o localizar otros elementos volátiles o gases tales como el mercurio y el radón.

El mercurio es un elemento que se halla asociado a numerosas acumulaciones de metales sulfurosos, así como en numerosos procesos industriales, en pesticidas y en los combustibles orgánicos. El proceso de volatilización tiene lugar como resultado de la oxidación de compuestos organometálicos y de los propios sulfuros.

El gas radón que procede del proceso de desintegración del radio, es un elemento muy familiar en rocas ricas en uranio y torio y en los combustibles y desechos nucleares. Son bien conocidos sus efectos cancerígenos en las áreas ricas en dicho elemento.

Tabla 2.- Técnicas analíticas de mayor uso. Grado de la técnica: Excelente, Muy buena, Buena. Hofman (1992)

Table 2.- Most used analytical techniques. Excellent, Very good and good. Hofman (1992)

<b>Técnica</b>	<b>Elementos</b>
EE	<i>Li, Be, B</i>
FRX	<b>Rb, Sr, Ba, Y, Zr, Nb, Ga, K, Mg, Ti, Cr, Ni, Cu, Zn, Al, Si, Sn, P, S, Na, V, Mn, Fe, Co, Pb.</b>
INAA	<b>Na, Cs, Ra, Sc, La, Ac, Hf, V, Ta, W, Re, Fe, Ru, Os, Co, Rf, Ir, Pd, Pt, Au, In, As, Sb, Po,</b> <b>Cl, Br, I, At, Ar, Rn, Rb, Ag, Hg, Ga, U, Ba, Ni, Cu, Zn, Al.</b>
ICP-AES	<b>K, Be, Mg, Ca, Ti, Mo, Ni, Cu, Ag, Zn, Cd, Al, Tl, Si, Ge, Sn, P, Bi, Te, Na, Sr, Zr, V, Mn,</b> <i>Fe, Co, Pd, Pt, Pb, Se</i>
ICP-MS	<b>Pm, Er, Tm, AA Li, Hg, Pb,</b>
SIE	<b>F</b>

Tabla 3.- Técnicas analíticas utilizadas en los diferentes métodos de prospección.

Table 3.- Analytical techniques used in the different prospecting methods.

	<b>INAA</b>	<b>ICP-AES</b>	<b>ICP-MS</b>	<b>EAA</b>	<b>RFX</b>
<b>Sedimento</b>	Au, As, Ba, Br, Ce, Co, Cr, Cs, Fe, Eu, Hf, Hg, La, Lu, Mo, Na, Ca, Nd, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Sm, Ta, Th, Tb, U, W, Yb			Ag, Cd, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, As, Bi, Hg	Sn Zr Ti
<b>Suelos</b>	Au, As, Ba, Br, Ce, Co, Cr, Cs, Fe, Eu, Hf, Hg, La, Lu, Mo, Na, Ca, Nd, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Sm, Ta, Th, Tb, U, W, Yb.	Ag, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn		As, Sb, Bi, Hg	
<b>Vegetación</b>	Au, As, Ag, Ba, Br, Ce, Co, Cr, Cs, Fe, Eu, Hf, Hg, K, La, Lu, Mo, Na, Ca, Nd, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Sm, Ta, Th, Tb, U, W, Yb, K.			Ag, Cd, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn.	
<b>Aguas</b>	Au, As, Ba, Br, Ce, Co, Cr, Cs, Fe, Eu, Hf, Hg, La, Lu, Mo, Na, Ca, Nd, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Sm, Ta, Th, Tb, U, W, Yb ,		Li, V, Cr, Co, Ni, Cu, As, Se, Cd, Sb, T.R., Pb, Bi, U, As, ..		
<b>Rocas</b>	Au, As, Ba, Br, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Hf, Hg, La, Lu, Mo, Na, Nd, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Sm, Ta, Th, Tb, U, W, Yb, Cl.	Al, Ag, B, Be, Bi, Ca, K, Na, Ni, Fe, Mg, Mn, P, Si, Ti, V, Zr, Dy, Gd, Y		Li	Sn Zr Ti

### 3.2.2. Muestreo, análisis y representación.

**A).** Para realizar un muestreo adecuado, es necesario tener en cuenta:

- la composición litológica y mineralógica del sector a investigar ya que los materiales litosféricos presentan diferentes clarkes.
- los elementos adsorbidos tanto por óxidos e hidróxidos de Fe y Mn como por arcillas adsorbentes y/o materia orgánica. Principalmente para sedimentos en redes de drenaje, suelos, aguas (elementos en suspensión) y vegetación.
- las características climáticas (presión, temperatura y humedad del suelo) para la atmogeoquímica (Lovell, 1980 y Fursov, 1990); estación y órganos para la vegetación (Brooks, 1972); características morfológicas, zonalidad y horizontes del suelo; conductividad y pH de las aguas.
- el muestreo podrá ser de tipo aleatorio en litogeoquímica, atmogeoquímica e hidroggeoquímica (pozos y fuentes); dicotómico para aguas superficiales y sedimentos en redes de drenaje; mediante malla regular para la vegetación, suelos, rocas, gases en suelos (Hg, y Rn) y aguas si estas últimas se toman a partir de sondeos.

**B).** Una vez tomada las muestras, su preparación y tratamiento analítico se realiza en base a:

- un secado: para rocas, sedimentos, vegetación y suelos y evaporación a sequedad (en algunas técnicas hidroggeoquímicas). Este, en función de la presión atmosférica (Viladevall 1983), obliga a que se realice (vegetación, suelos y sedimentos), a una temperatura determinada (no superior a los 60°C para evitar la volatilización del mercurio).
- un tamizado, que para suelos y sedimentos se realiza en mallas inferiores a 60 mesh ASTM (minerales y materiales resistentes como los óxidos), e inferior a 80 mesh ASTM para el resto. En aguas se realiza, generalmente, un filtrado y una acidificación a  $\text{pH} \leq 1$ .
- una separación de las distintas fases minerales (sedimentos, rocas y suelos), mediante un concentrador hidrogravimétrico y posterior separación magnética, electromagnética, electroestática, líquidos densos (Licor de Thoulete) y manual.

Una vez secadas, tamizadas y/o molidas (rocas y vegetación), las muestras podrán ser lixiviadas mediante distintos métodos de digestión. Estos podrán ser: total

(HF agua regia), parcial (agua regia) y selectiva (HCl;  $\text{HNO}_3$ ;  $\text{H}_2\text{O}_2$ ), por citar algunos.

Una vez la muestra haya sido solubilizada (para la vegetación, en algunos casos, se procederá a una incineración previa a la lixiviación), o simplemente en sólido, se determinarán los distintos elementos químicos mediante técnicas analíticas específicas o multielemento.

Entre las muestras solubilizadas, tenemos para la detección multielemento o simplemente, específica: la Espectrometría de Emisión por Plasma (ICP-AES) ampliamente descrita en la literatura y resumida por Jarvis and Jarvis (1992); la Espectrometría de Absorción Atómica (AAE) resumida por Viets and O'Leary (1992); ICP con espectrometría de masas, resumida por Hall, 1992. Otras técnicas más específicas serían: Colorimetría, Gravimetría, Electrodo Específico (SIE), amalgamación (Hg). Entre las muestras en sólido, para su determinación multielemento o específica tenemos: la Fluorescencia de Rayos-X (FRX), resumida por Potts and Peter (1992) y la Activación Neutrónica (INAA) resumida por Hoffman, (1992). En la tabla 2 se representan, según Hoffman (1992, op. citada), los distintos grados de las diferentes técnicas analíticas de mayor uso (hay que resaltar que el uso de las distintas técnicas en exploración geoquímica se halla asociada a la relación eficacia-costo).

Las técnicas por nosotros utilizadas en las distintas campañas de exploración geoquímica multielemento, se resumen en la tabla 3. En ella se observa que la INAA, es una de las técnicas que mayoritariamente hemos empleado para sedimentos en redes de drenaje y para vegetación seca.

**C).** Una vez analizadas las muestras dentro del abanico de datos cualitativos, semicuantitativos y cuantitativos obtenidos, el paso siguiente es el del tratamiento estadístico con el fin de determinar los fondos geoquímicos, los umbrales de anomalías y la relación entre los elementos o variables.

#### **C1. Análisis univariable o elemental**

En este análisis se determina el modelo o distribución que un elemento sigue dentro del conjunto de variables analizadas. A partir de esta distribución se pueden calcular los parámetros que permiten definir los umbrales de anomalías.

A partir de los histogramas de frecuencias absolutas y/o de ciertos valores estadísticos, se definen el tipo de

ley o distribución que sigan los resultados analíticos de una variable o parámetro a analizar. La ley que habitualmente presentan los resultados geoquímicos por su propio comportamiento en los distintos ambientes geoquímicos anteriormente indicados, es la ley lognormal, en la que los logaritmos de los valores hallados siguen una ley de distribución normal, ley que como anomalías crustales que són, presentan todos los yacimientos minerales y en consecuencia también los vertidos o emisiones contaminantes.

Fijar los límites a partir de los cuales los valores obtenidos se pueden considerar anómalos es fundamental en todo estudio geoquímico, sea cual sea su finalidad. No obstante, antes de definir los valores anómalos, será necesario establecer los valores de fondo con respecto a los diferentes clarkes o "background", con los cuales se les pueda comparar. El fondo se define como el intervalo normal de concentración de un elemento en una área determinada.

El umbral o umbrales de anomalías representa el límite superior de las fluctuaciones del fondo y, por lo tanto, se halla en función del valor de los fondos y de la dispersión. La medida de esta dispersión es muy importante, ya que dos poblaciones que presenten el mismo valor de fondo pueden tener diferentes umbrales si sus coeficientes de desviación son diferentes.

El valor de fondo y de los coeficientes de desviación se pueden calcular gráficamente en el diagrama de frecuencias acumuladas logarítmico-probabilístico. Así, el valor de fondo viene dado por la abscisa correspondiente a una frecuencia del 50%, que coincide aproximadamente con la media geométrica. El umbral de anomalía se sitúa en la abscisa que corresponde a una frecuencia del 84% ó 16% (Font, 1983 op. citada).

Para representar gráficamente en mapas la distribución de los diferentes valores que toman una variable determinada, se acostumbra a utilizar diferentes intervalos de valores que se basan en las características de las distribuciones lognormales y en los valores de los umbrales de anomalía calculados en el gráfico de frecuencias acumuladas.

## **C2. Análisis multivariable**

Su finalidad es la de extraer de forma condensada la mayor parte de la información contenida en un conjunto de datos. Dentro del gran número de tratamientos multi-

variables que existen el que se utiliza generalmente en prospección geoquímica, es el análisis de componentes principales.(ACP).

El fundamento de la aplicación del ACP es el de reemplazar las variables iniciales correlacionadas por unas nuevas variables independientes o componentes principales. Estas nuevas variables (factores o componente), se determinan de tal manera que expliquen el porcentaje de varianza mayor de la población. Se calcula también la contribución de cada variable antigua en cada componente nuevo, y el coeficiente de cada muestra respecto a las nuevas variables.

En la mayor parte de los tratamientos estadísticos multivariados por realizados por nosotros tanto para aguas, vegetación, suelos como en rocas, hemos empleado normalmente entre 15 y 30 variables. Como peso significativo de las variables dentro de cada componente o factor, se ha empleado el superior a 0,5.

## **C3. Representación de los datos**

La representación de los datos en forma de fondos, anomalías y componentes principales con sus cargas respectivas, pueden representarse en soportes gráficos en forma de mapas temáticos geoquímicos (SIG), previo procesado de interpolación.

Con la herramienta de la representación cartográfica, podrá tener lugar la interpretación y discusión de los resultados para su utilización ulterior como guía medio ambiental, epidemiológica o para la prospección de recursos naturales.

## **4. ALGUNOS EJEMPLOS DE GEOQUÍMICA APLICADA AL MEDIO AMBIENTE.**

### **4.1. Sedimentos en redes de drenaje**

Este método, desarrollado dentro de un extenso programa de reconocimiento geoquímico en Catalunya y concretamente en las Cadenas Costeras Catalanas, Vall d'Aràn, Cerdanya y algunos sectores del Pirineos Centro-Orientales. El programa se inició en 1981 en gran parte con el Servei Geològic de la Generalitat de Catalunya, y en él se han cubierto en la actualidad mas de 4.300 Km<sup>2</sup> de territorio, principalmente en áreas de baja presencia industrial y urbana a excepción del Baix Llobregat y Maresme. Dentro del mismo período se ha

realizado un muestreo en otros territorios como el Sector de Tramontana de la Isla de Menorca y la Peña de Francia y Sierra de Gata en Salamanca. Globalmente se han cubierto más de 5.000 Km<sup>2</sup> y se han tomado mas de 9.000 muestras.

Como método soporte de futuras actuaciones en el reconocimiento del territorio en concepto de exploración de recursos y medio ambientales, los sedimentos en redes de drenaje han permitido conocer los fondos geoquímicos de elementos tales como el Pb, Zn, Cu, Fe, Mn, Ni, Co, Cd, As, Sb, Bi, Se y Hg en todas las áreas indicadas. En unos 2.100 Km<sup>2</sup>, además de los elementos indicados, se han determinado los contenidos en: Ag, Au, Br, Ce, Cr, Cs, Eu, Hf, Ir, La, Lu, Mo, Na, Ca, Nd, Rb, Sc, Sr, Sm, Ta, Th, Tb, U, W, Yb. Puntualmente en algunos sectores se han definido además, el Zr y V.

Programas similares han sido realizados en otros sectores del territorio del Estado Español por el ITGM, así como en la UE, EUA, Canadá, etc.

Estos programas permiten determinar (Figs. 4 y 5) como los elementos caracterizan el substrato geológico y tal como venimos indicando al paisaje geoquímico.

Así en la fig. 4, se representan, a partir de 2.300 muestras de sedimentos en redes de drenaje, los contenidos en arsénico del Macizo Paleozoico del Montseny-Guilleries (Barcelona-Girona) con una extensión de unos 1.200 Km<sup>2</sup>. Este elemento se distribuye en forma de fondos, con valores entre 0,75-1,7 ppm para los granitos y entre 8,5 y 13 ppm para las pizarras y esquistos y anomalías con valores superiores a 3,8 ppm para terrenos graníticos y superiores a 22 ppm para terrenos pizarrosos.

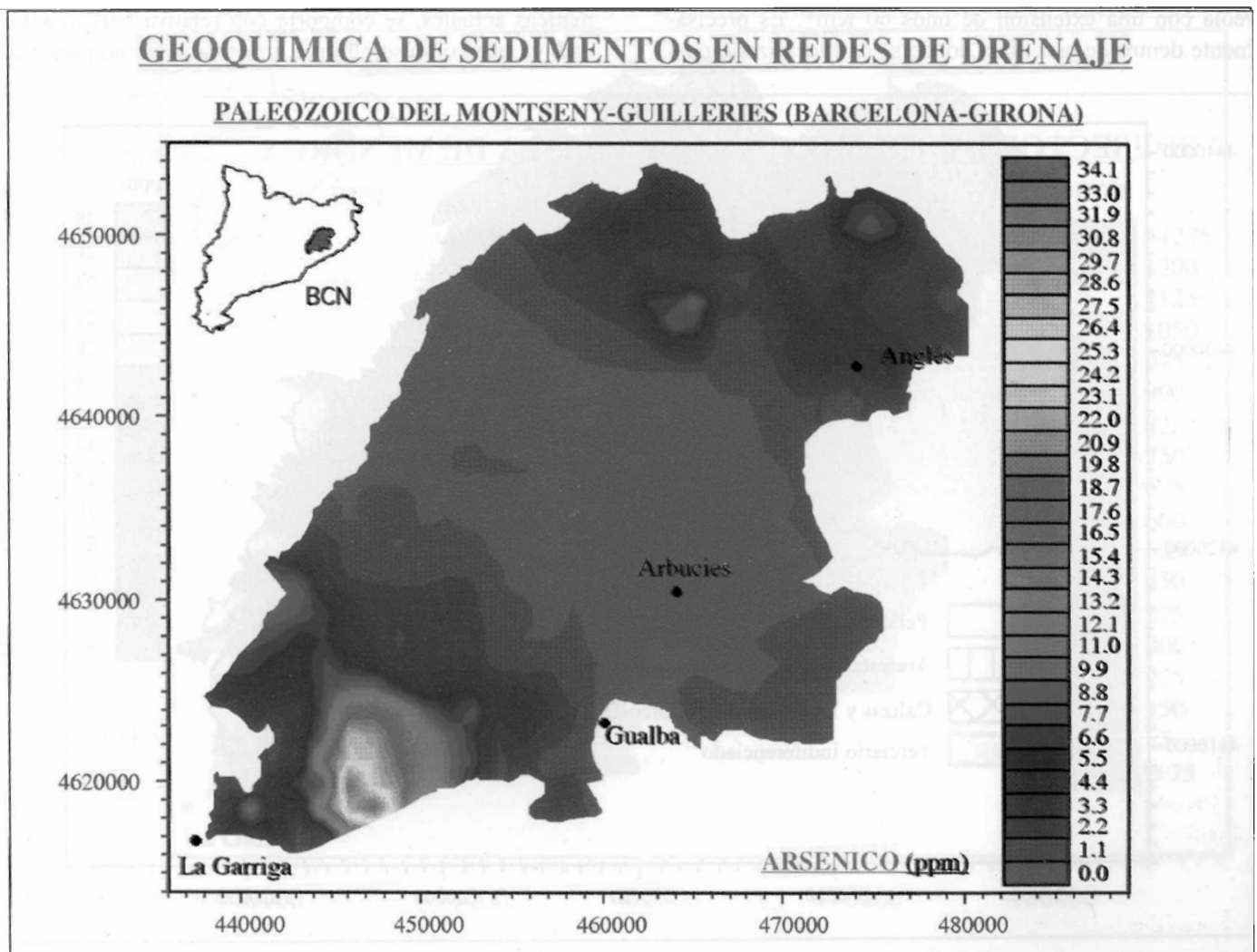


Fig. 4.- Geoquímica de los sedimentos de redes de drenaje en el macizo Paleozoico de Montseny-Guilleires.

Fig. 4.- Stream Sediments Geochemistry in the Paleozoic of the Montseny-Guilleries.

La distribución de fondos y anomalías, nos muestra una marcada diferenciación entre los materiales graníticos que ocupan la parte central y más Sur-Occidental del macizo, con los materiales de alto grado metamórfico (micaesquistos y gneises) de la parte Nor-Oriental y los materiales pizarrosos y esquistosos del sector Sur-Occidental. Todos estos materiales, junto con sus respectivos fondos y anomalías de los distintos elementos químicos, configuran el "paisaje geoquímico del macizo". Las zonas anómalas podrán, además, dar lugar a contenidos también anómalos en la Pedoesfera, Biosfera e Hidrosfera con sus posibles consecuencias sobre la cadena trófica.

En el sector Sur-Occidental, anómalo en arsénico con respecto a la parte central y Nor-Oriental, hay que diferenciar, dentro de la aureola anómala, materiales como los esquistos negros (ricos en sulfuros) y las mineralizaciones polimetálicas, configurando entre ambas, una aureola con una extensión de unos 60 Km<sup>2</sup>. Es precisamente dentro de esta zona dónde se han localizado pos-

teriormente, en aguas de abastecimiento de las urbanizaciones, elevados contenidos en este elemento, que las hacen no potables para el consumo.

Otro ejemplo de paisaje geoquímico es el representado por la Fig. 5., en el que se configuran los materiales y sus fondos y anomalías geoquímicas del sector de Tramontana de la Isla de Menorca. Este sector lo componen materiales del Primario y Secundario. Al igual que en el ejemplo anterior, pero en este caso tomando otro elemento como el cobre, observamos también como de forma globalizada los fondos (entre 3 y 6 ppm), se sitúan en los materiales del Secundario y las anomalías (> 20 ppm) en los materiales del Primario ( Pérmico y Permo-Trías).

Es interesante resaltar como el cobre, acumulado en una época climática de extrema aridez, lo que implicaba una movilidad relativamente alta, en las condiciones climáticas actuales, se comporta con relativa baja movilidad, ya que como se observa, prácticamente no presenta

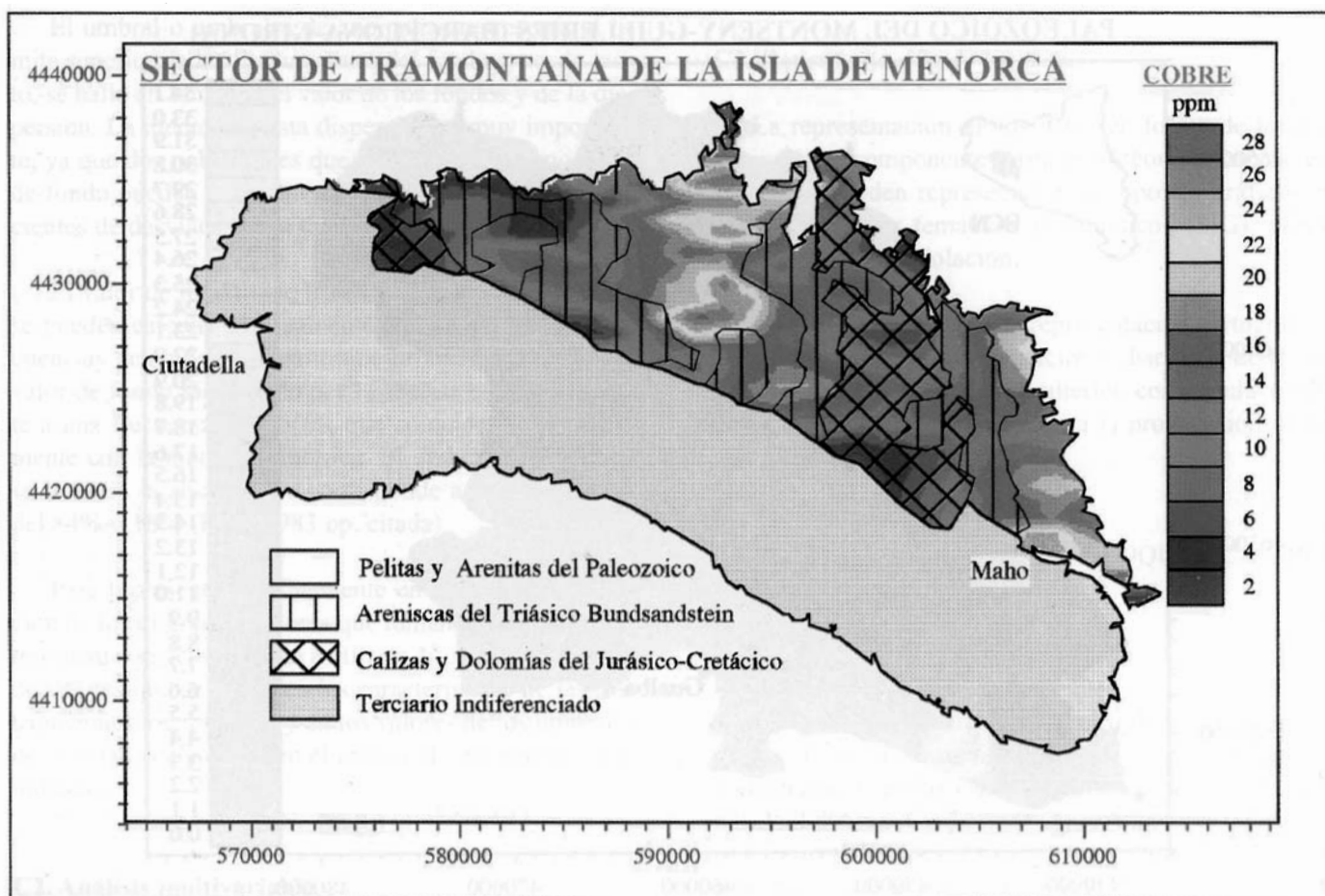


Fig. 5.- Contenido en cobre de los sedimentos de la red de drenaje en la parte norte de la isla de Menorca.

Fig. 5.- Copper in stream sediments in the northern part of the Menorca Island.

dilución en la dirección de los torrentes cuyas de direcciones son predominantemente N-S. Si bien las anomalías de cobre no parecen representar, a excepción de zonas puntuales en donde existen mineralizaciones y contaminación por parte de antiguas explotaciones mineras, efectos sobre la cadena trófica, la carencia de este elemento en otros sectores de la Isla bien podría ser objeto de una hipocuprosis en el ganado.

En ambos ejemplos se concluye que el método que mejor define el paisaje geoquímico y el interés que este puede aportar en el reconocimiento del territorio, son los sedimentos en redes de drenaje.

#### 4.2. HIDROGEOQUÍMICA EN REDES DE DRENAJE

Se presenta para este método un ejemplo del contenido en flúor a partir de 1.509 muestras de aguas superficiales del macizo del Montseny-Guilleries anteriormente mencionado (Fig. 6). Al igual que para el ejemplo precedente, el contenido de este elemento en las aguas nos muestra claramente el reflejo de la litología, a partir de los fondos geoquímicos, 150 ppb para los materiales graníticos que ocupan la parte central del macizo y los 75 ppb de los materiales pizarrosos y esquistosos del sector Nor-Oriental y Sur-Occidental de éste. Así mismo y dentro de ambas litologías, aparecen fuertes

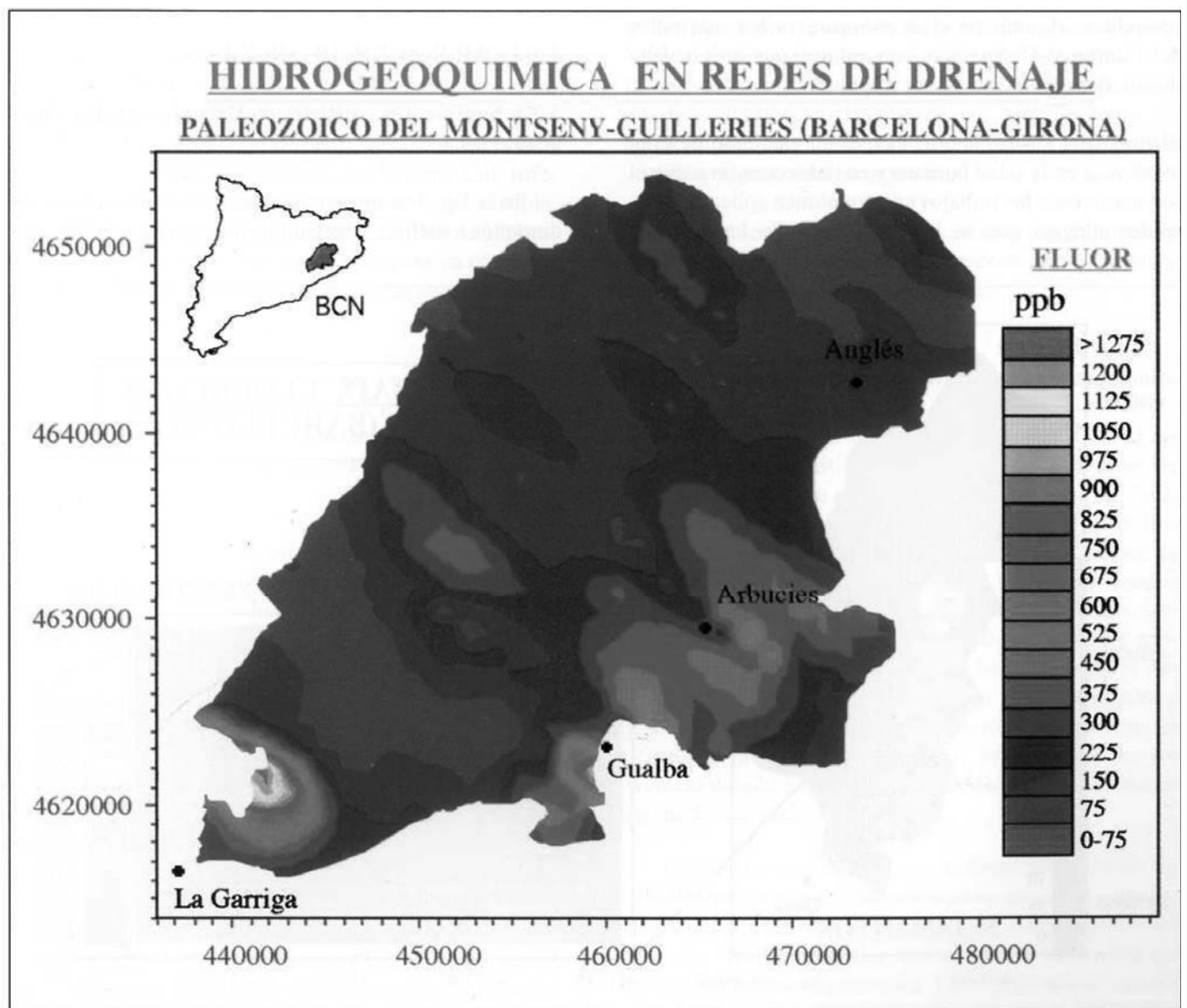


Fig. 6.- Hidrogeoquímica de flúor en el Paleozoico del Montseny-Guilleries.

Fig. 6.- Fluoride hydrogeochemistry in the Paleozoic of the Montseny-Guilleries.

anomalías que reflejan una serie de indicios y mineralizaciones de fluorita de dirección NW-SE. Estas direcciones se hallan alineadas en una dirección SE-NW en ambos flancos del macizo, que a su vez se encuentra delimitado por las fracturas de la misma dirección y que representan el borde meridional de la Depresión del Ebro y septentrional del Vallés - La Selva (Font y Viladell, 1988).

Estas mineralizaciones y sus escombreras, marcan las fuertes anomalías de la parte meridional y Sur -Occidental del macizo. Sin embargo, la fuerte aureola de dispersión secundaria en la zona de Gualba-Arbucies parece producida por posibles mineralizaciones poco conocidas, algunas de ellas asociadas a los mármoles del Cámbrico-Ordovícico, con valores que en Gualba llegan a alcanzar más 3 ppm en aguas.

El flúor, por sus características, es un elemento de gran incidencia en la salud humana y en consecuencia sobre él son numerosos los trabajos en geoquímica aplicada (geoepidemiología) que se han realizado. Su carencia en

aguas (< 750 ppb), tiene gran incidencia en la producción de la caries y su exceso (>1.250 ppb), en la fluorosis. Así dentro del paisaje geoquímico de la fig. 6, se observa un amplio sector con marcadas carencias en este elemento, otro sector con contenidos entre 500 y 1.000 ppb que se situaría dentro del ambiente geoepidemiológico correcto, y un tercer sector con valores superiores a los 1.000 ppb, que podría representar unos factores de riesgo epidemiológico, siempre y cuando las aguas de abastecimiento de la población autóctona se mantengan en dichos niveles. Dentro de este último sector las aguas de manantial analizadas, también presentan valores muy superiores a las 1.000 ppb.

### 4.3. COMBINACIÓN DE MÉTODOS.

#### 4.3.1. Sedimentos en Redes de Drenaje - Suelos - Bio-geoquímica.

En la fig. 7 se presenta una acción combinada de sedimentos - suelos - vegetación en un sector situado den-

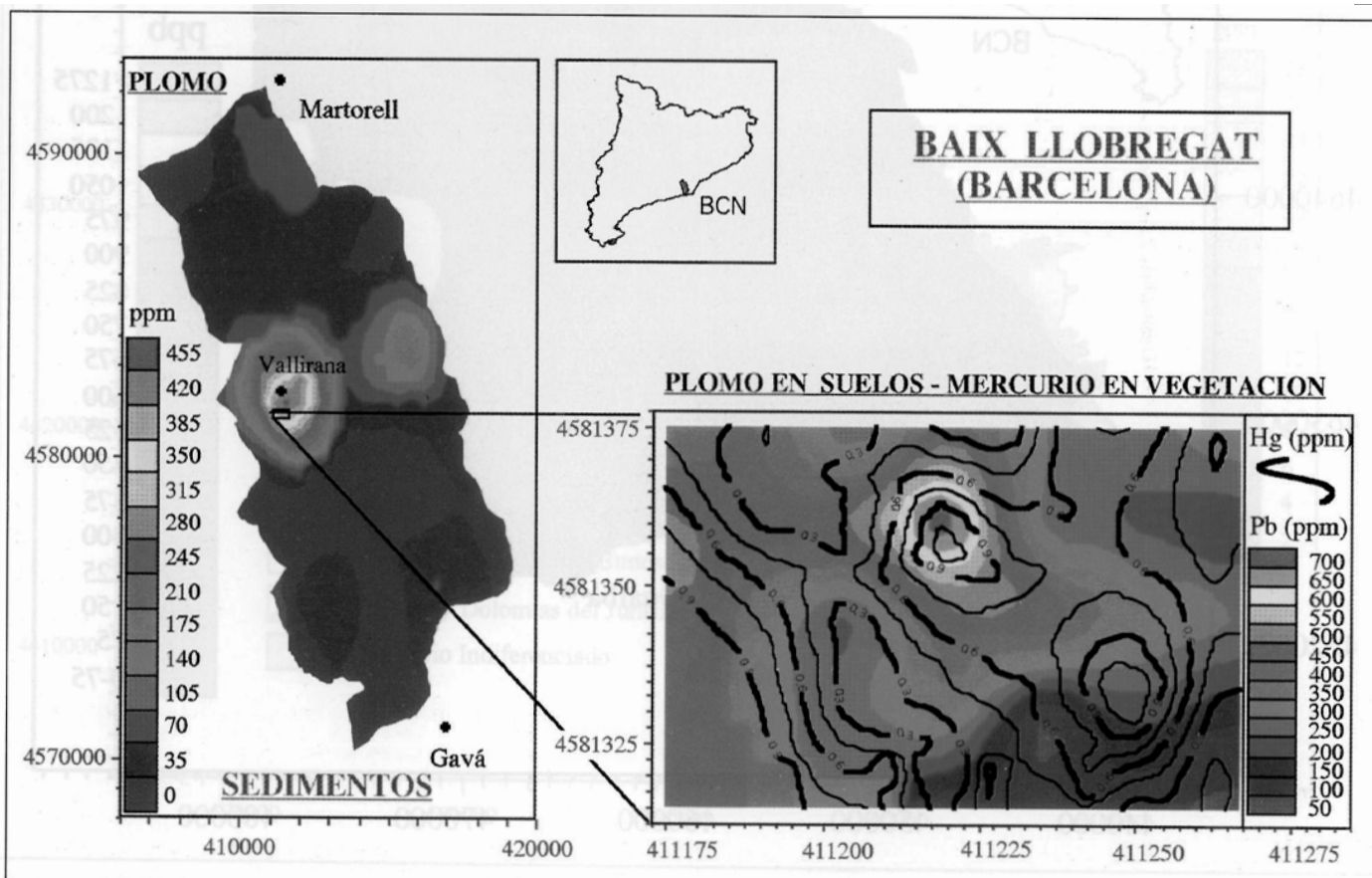


Fig. 7.- Contenido en plomo en los sedimentos y suelos y mercurio en vegeración cerca de Barcelona (Baix Llobregat).

Fig. 7.- Lead in stream sediments and soils and mercury in vegetation near Barcelona (Baix Llobregat).



tro del cinturón industrial de Barcelona. En este sector, existe una fuerte presencia de asentamientos residenciales que en la década de los setenta, eran de segunda residencia y que en la actualidad son de primera residencia.

El sector del Baix Llobregat presenta una litología compuesta por pizarras y arenitas del Paleozoico (similares a las del Montseny-Guillerics), areniscas y calizadolomías del Triásico, algunas arcillas del Mioceno y materiales aluvionares (Cuaternario) del Río Llobregat. Los sedimentos en redes de drenaje se tomaron sobre los materiales del Paleozoico y Triásico, enmarcados dentro de la fig. 7.

El resultado de la investigación es, entre otros, la detección de una fuerte presencia en contenidos de plomo (los fondos deberían de situarse entre 35 y 80 ppm y las anomalías con valores > 180 ppm), que afectan principalmente a las calizas y dolomías del Muschelkalk Inferior del sector de Vallirana-Cervelló y en menor medida, a las pizarras negras paleozoicas de Sant Boi de Llobregat. La presencia del plomo en esta área era ya conocida de antiguo por la existencia de pequeñas explotaciones de galena (Andreu, 1986).

Es en la zona de antiguas explotaciones pero fuera de sus escombreras y dentro de un sector residencial, dónde se tomaron muestras de suelo mediante una malla regular de 15 metros, con un total de 30 muestras de suelo y 26 de vegetación.

El muestreo se realizó en primavera y se tomaron 5 kg. de muestra de suelo (horizonte A+B) y 200 gr. de hojas de arbustos y pinos: *Erica multiflora* y *Pinus halepensis*.

El resultado ha sido, el de la presencia, en forma de aureola de una fuerte anomalía en Pb-Zn (el Cd presenta valores bajos por tratarse de esfaleritas pobres en este metal), en los suelos, que refleja en superficie el sustrato enriquecido en estos metales y que son la principal causa, a su vez de la anomalía en éstos en los sedimentos en redes de drenaje del sector.

Sobre la vegetación, llama la atención elevados contenido en mercurio que oscila entre 150 y 1.200 ppb (el plomo no ha sido analizado). Este elemento, también nos resalta la mineralización de sulfuros (ya que es un elemento indicador de éstos), si bien no se descarta (presencia de fondos elevados regionales), una contaminación atmosférica en este metal.

A partir de esta acción combinada de tres métodos geoquímicos, se perfila claramente el "paisaje geoquímico" del área investigada, pudiéndose determinar en él como la acción puntual, en este caso de pequeñas mineralizaciones, influyen no tan solo en la Pedoesfera sino también en la Biosfera y en definitiva en una extensa área del territorio indicado. En consecuencia teniendo en cuenta que el plomo, cinc (cadmio) y mercurio actúan directamente sobre la cadena trófica (Adriano, 1986; Kabata-Pendias & Pendias, 1989).

Teniendo en cuenta que:

- A. que la mayor parte de las hortalizas son no barrera frente a elementos como Pb y Hg y Cd.
- B. que el área afectada por las anomalías, se sitúa dentro de zonas residenciales en la que existen pozos de aguas (suministro particular) y numerosos huertos particulares y alguno de tipo extensivo.

Hemos de considerar a toda el área afectada por la fuerte anomalía y solo a efectos de consumo de aguas y vegetación, como de riesgo probable.

#### 4.3.2. Sedimentos en Redes de Drenaje-Atmogeoquímica.

El último ejemplo que se presenta (Fig. 8) es el resultado de una investigación en sedimentos de redes de drenaje realizado en el Paleozoico de la Sierra de Collserola que limita por el Sur con Barcelona ciudad. Entre los 34 elementos analizados, llama la atención la distribución del uranio dentro de la Sierra con fondos normales en la parte central ocupada por pizarras arenosas y cuarcitas de 2 a 3 ppm, fondos elevados y anomalías (>6 ppm) en el sector Nor-Oriental (pizarra negras) y Sur-Occidental ocupado por pizarras negras y granitos. En estas últimas anomalías, se observa el efecto de dispersión secundaria (dirección de los torrentes) debido a la elevada movilidad de este elemento en medio oxidante.

Desde hace quince años conocíamos, por trabajos realizados por nosotros y no publicados, que en los alrededores del Monasterio de Sta. Creu d'Olorda, situado en el sector Sur-Occidental, existían fuertes anomalías radioactivas (radiación gamma). Estas anomalías, asociadas a los esquistos negros, pensábamos que podrían estar originadas por la actividad de radionúclidos del uranio, torio o potasio. La confirmación de anomalías de uranio mediante la geoquímica en redes de drenaje, motivó un

estudio exhaustivo realizado por T. Puntos en 1993 (trabajos inéditos), para detectar la presencia de Radón en este sector.

El radón es un gas bastante raro pero radioactivo, que se forma en diversos medios (suelos, materiales de construcción, agua y aire) y susceptible de ser difundido en la atmósfera. Por su elevada actividad (radiación alfa) es un elemento con efectos cancerígenos, principalmente por sus productos de desintegración.

Tres series importantes de desintegración radioactiva son ampliamente conocidas en la naturaleza: el  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$ . Estos núclidos se desintegran a su vez en series radioactivas intermedias para dar lugar al  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{224}\text{Ra}$  y éste al Radón  $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  (denominado torón) y  $^{222}\text{Rn}$  (radón propiamente dicho). Finalmente éste, se desintegra en isótopos de polonio, plomo y bismuto (ver tabla 4), que una vez inhalado y en función de su vida media, pueden desarrollar la patología indicada.

En sector indicado, se tomaron un centenar de muestras de gas radón en una malla regular de 50 metros, en el verano de 1993 mediante un sensor Alfa Card. Su distribución tal como nos muestra la Fig. 8, es la de dos aureolas con valores extremadamente altos (1.000 choques/minuto), situados en ambos lados del Monasterio (en su interior no se han realizado ensayos). Comparativamente, los contenidos medios observados en Collserola y en otras áreas de las Cadenas Costeras Catalanas se sitúan sobre los 2 choques/minuto con valores puntuales de 30 choques/minuto, mientras que en este sector los valores de fondo se hallan entre 5 y 7 choques/minuto, con los valores extremos ya indicados.

Si bien en este sector los contenidos en gas Radón son muy elevados, los efectos sobre el público que se re-

Tabla 4.- Radionúclidos habitualmente utilizados en prospección geoquímica.

Table 4.- Common radionuclides used geo chemical prospecting.

Radionúclido	Vida media	Energía en MeV
radio-226	1.600 años	
radón-222	3,8 días	5,49
polonio-218	3,1 minutos	6,00
plomo-214	26,8 minutos	
bismuto-214	19,7 minutos	
polonio-214 163,7	$\mu$ segundos	7,69
plomo-210	22,3 años	

crea en las áreas del parque, no parecen que puedan ser graves por la dispersión del gas, una vez llega a la atmósfera y por la estancia puntual de los usuarios. No obstante si puede ser peligroso, en el caso de acumulación, en la viviendas de este sector.

El paisaje geoquímico de la Sierra de Collserola nos muestra pues, áreas potencialmente peligrosas en gas Radón como son el sector Nor-Oriental y Sur-Occidental y extrapolando, por las presencia de materiales geológicos de características similares al de las zonas anómalas, a otros barrios de la parte Norte de la Ciudad de Barcelona (Pedralbes, Horta, etc.), en dónde por una insuficiente impermeabilización de los edificios, puede acumularse el gas en su interior y ser inhalado por sus habitantes.

## 5. CONCLUSIONES

**A.** La geoquímica ambiental, unida a la geoepidemiología y la prospección geoquímica, componen el armazón de la geoquímica aplicada que debería definirse como "Geoquímica aplicada al medio ambiente". Esta, junto con la mayoría de las disciplinas científicas, incluyendo la economía y la ordenación jurídica, constituye a su vez la base de la modelización y definición del "Paisaje Geoquímico" y en consecuencia, la determinación de los efectos posibles, positivos y/o negativos, que este ejerce sobre el medio ambiente en general y sobre la sociedad en particular.

**B.** Los ejemplos propuestos, pretenden demostrar a partir de las técnicas de muestreo, análisis e interpretación de los distintos métodos geoquímicos, como se puede confeccionar una parte del "Paisaje Geoquímico" y completarlo con otras herramientas científicas.

**C.** Los sedimentos en redes de drenaje es el mejor método en exploración geoquímica a escala regional, para determinar la presencia y asociación de elementos químicos en el "Paisaje". Estos, permiten discriminar los distintos aportes al medio, mediante las anomalías de dispersión secundaria y determinar si son de origen primario o secundario y en este último caso, si su origen es natural o antrópico. El muestreo y tratamiento es de bajo costo así como las distintas técnicas analíticas multielemento su almacenaje no plantean ningún tipo de problemas.

**D.** La Hidrogeoquímica en redes de drenaje es también un excelente método de reconocimiento regional, ya

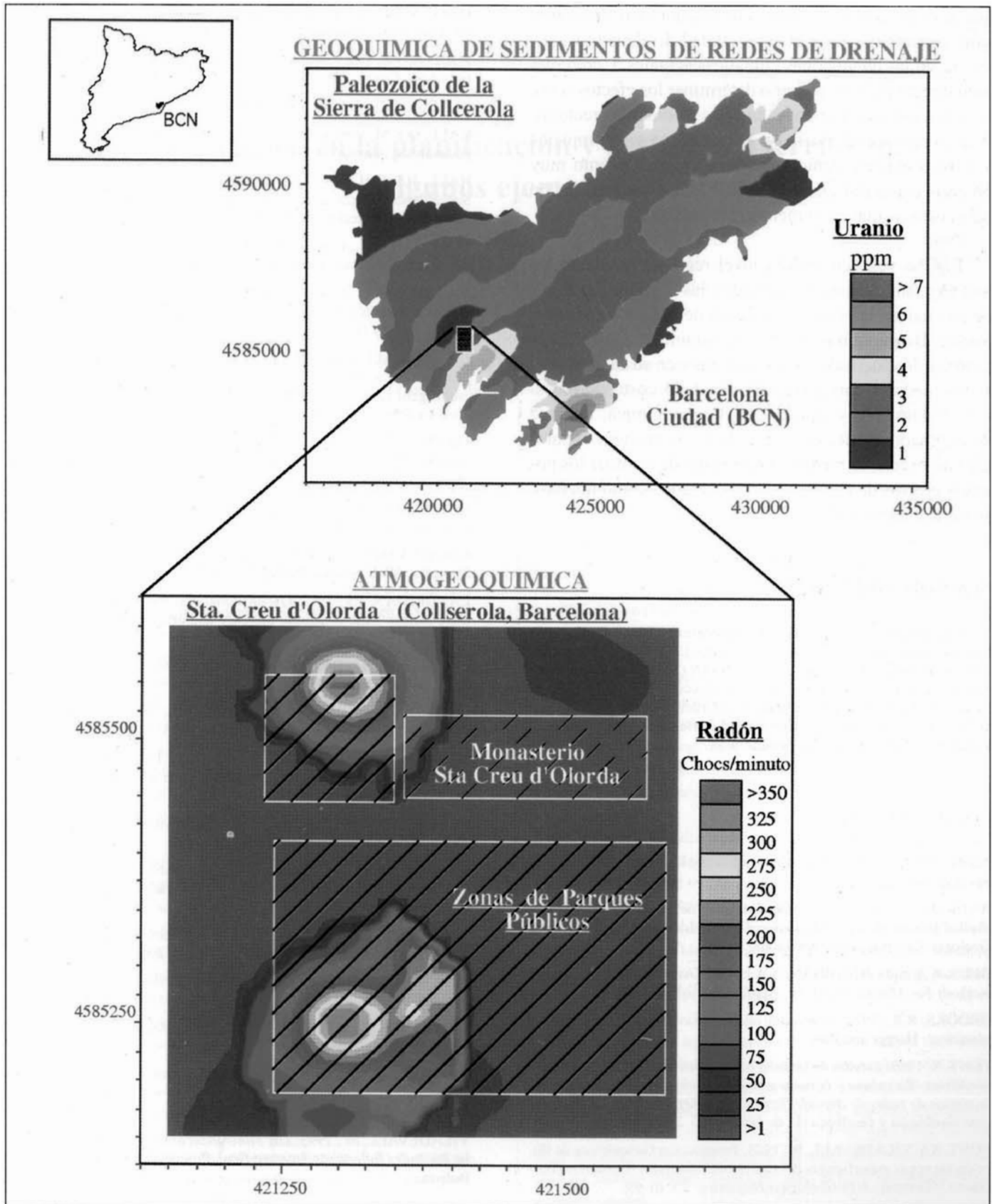


Fig.8.- Contenido en uranio de los sedimentos aluviales en Collserola

Fig.8.- Uranium in stream sediments and radon air in the Collserola mountain range near Barcelona City.

que la extensión y estructuras de sus aureolas de dispersión, permiten reconocer la movilidad de elementos químicos, en las condiciones climáticas actuales. Como método directo permite prever o determinar los efectos sobre la población y definir en su caso las medidas correctoras. A nivel regional el muestreo y almacenaje son complejos y si bien existen técnicas analíticas multielemento muy precisas como por ejemplo el ICP-MS, éstas son mucho más costosas que en el método precedente.

E. Una vez detectado a nivel regional mediante los métodos anteriormente indicados las distintas aureolas de anomalías, la complementación de métodos como los Suelos, Biogeoquímica o Atmogequímica, permite determinar los focos de contaminación y en su caso plantear las medidas correctoras. Por su bajo costo de muestreo, tratamiento y análisis, la Biogeoquímica, una vez determinado el efecto barrera de la vegetación, es también un excelente método directo para determinar los posibles efectos de elementos, considerados como nocivos, sobre la cadena trófica.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado con el soporte del Servei Geològic de La Generalitat de Catalunya (años 1981-1983-1984-1992) y con el proyecto de la EEC Contract MA2M-CT90-0009 (SMA). Se agradece así mismo, la ayuda de los alumnos de Prospección Minera y Geología Económica, y de Geología Aplicada a la Ordenación del Territorio de la Facultad de Geología de la Universidad de Barcelona, en el muestreo y preparación de las muestras geoquímicas.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- ADRIANO, D.C., 1986: *Trace Elements in the Terrestrial Environment*. Springer-Verlag.
- ANDREU, A., 1986: *Las Mineralizaciones de Pb-Zn-Ba en el Muschelkal Inferior de los Catalánides*. Tesis Doctoral. Facultad de Geología. Universidad de Barcelona. 101.p
- BEUS, A.A and GRIGORIAN, A.A., 1977: *Geochemical Exploration methods For Mineral Deposits*. Applied Publishing LTD.
- BROOKS, R.R., 1972: *Geobotany and biogeochemistry in mineral exploration*. Harper and Row.
- FONT, X. 1983: *Estudio de las mineralizaciones del Macizo Montseny-Guilleries (Barcelona y Girona) y su aplicación en la prospección geoquímica de redes de drenaje*. Tesis Doctoral. Edit. Dpto. de Prospección Geológica y Geofísica (U. de Barcelona). 2 vol. 534 pp.
- FONT, X Y VILADEVALL, M., 1988: Prospección Geoquímica de flúor en las aguas superficiales del macizo del Montseny-Guilleries (Barcelona y Girona). *Acta Geológica Hispánica* 23: 61-69.
- FORTESCUE, J.A.C., 1975: *The use of landscape geochemistry to process exploration geochemical data*. Elsevier.
- FORTESCUE, J.A.C., 1979: *Environmental Geochemistry*. Springer Verlag.
- FORTESCUE, J.A.C., 1992: Landscape geochemistry: retrospect and prospect-1990. *Applied Geochemistry* 7: 1-53.
- FURSOV, V.Z., 1990: Mercury vapor survey: techniques and results. *J. Geochem. Explor.*, 38: 145-156.
- GOLDSCHMIDT, V.M., 1954: *Geochemistry*. Clarendon Press.
- HALL, G.E.M. 1992: Insuctively coupled plasma mass spectrometry in geoanalysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 44: 201-249.
- HALL, H.I., DHARA, V.R., KAYE, W.E. i PRICE-GREEN, P. 1994: Surveillance of hazardous substance releases and related health effects. *Arch. Environ. Health*, 49: 45-48.
- HOFFMAN, E.L., 1992: Instrumental neutron activation in geoanalysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 44: 297-319.
- JACKSON, M.L., 1986: Geochemical characteristics of a land and its effect on human heart and cancer death rates in de United States and China. *Applied Geochemistry* 1:175-180.
- JACKSON, M.L.; ZHANG, J.L; LI, L.I. and MARTIN, F.M., 1986: The geochemical availability of soil Zn and Mo in relation to stomach and esophageal cancer in the People's Republic of China and U.S.A. *Applied Geochemistry* 1:487-492.
- JARVIS, I and JARVIS, K.E., 1992: Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry in exploration geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 44: 139-200.
- KABATA-PENDIAS AND A.PENDIAS, H., 1989: *Trace elements in soils and plants*. CRC Press.
- KOVALEVSKII, A.L., 1987: *Biogeochemical Exploration for Mineral Deposits*. VNU Science Press.
- LANDRIGAN, P.J., 1982: Occupational and community exposures to toxic metals: lead, cadmium, mercury and arsenic. *West J. Med.*, 137: 531-539.
- LEVISON, A.A., 1981: *Introduction to Exploration Geochemistry*. Applied Publishin Ltd.
- LOVELL, J.S., HALE, M. AND WEBB, J.S., 1980: Vapor geochemistry in mineral exploration. *Min. Mag.*, 143: 229-239.
- MIGNON, C., JOURDAN, E., NICOLAS, E. I GENTILLI, B., 1994: Effects of reduced leaded fuel consumption on atmospheric lead behaviour. *Chemosphere*, 28: 139-144.
- NRIAGU, J.O., 1988: A silent epidemic of environmental metal poisoning?. *Environ. Pollut.* 50: 139-161.
- NRIAGU, J.O. PACYNA, J.M., 1988: Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature*. 333 :134-139.
- POTTS, J. Ph and WEBB P.C., 1992: X-ray fluorescence spectrometry. *Journal of Geochemical Exploration*, 44: 251-296.
- PURVES, D., 1985: *Trace-element contamination of the environment*. Elsevier.
- SALOMONS, W. Y FORSTNER, U., 1984: *Metals in the Hydrocycle*. Springer Verlag. Berlin. 349 p.
- VIETS, J.G. and O'LEARY, R.M., 1992: The role of atomic absorption spectrometry in geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 44: 107-138.
- VILADEVALL, M., 1993: *Las Mineralizaciones Auríferas y Asociados en los Andes Bolivianos*. Informe final. Proyecto CEE. Ref.C11-00784-Bolivia.