

JULIAN RODRIGUEZ DIEZ
VICENTE POLO DIEZ DE SOLIS
FERNANDO DE PABLO DAVILA

**TRES ESTUDIOS
SOBRE EL MEDIO
NATURAL
EN CASTILLA
Y LEON**

CONSEJO GENERAL DE CASTILLA Y LEON

DGA
D

TRES ESTUDIOS
SOBRE EL MEDIO NATURAL
EN CASTILLA Y LEÓN



TH. 27303
C 1029380

CONSEJO GENERAL DE CASTILLA Y LEÓN

1952

**TRES ESTUDIOS
SOBRE EL MEDIO NATURAL
EN CASTILLA Y LEON**



CONSEJO GENERAL DE CASTILLA Y LEON

R. 25408



Confección:

SIMANCAS EDICIONES, S.A.
Polígono Ind. San Cristóbal, Parcela 152
Teléf. 29 51 55 (4 líneas)
Valladolid

Encuadernación:

ENCUADERNACIONES CABE-CARDE, S.A.
Polígono Ind. San Cristóbal, Parcela 154
Teléfs. 29 48 77/88
Valladolid

Depósito Legal:
VA-407-1983

INDICE GENERAL



HIDROGEOLOGIA DE LAS CUENCAS DEL ZAPARDIEL Y DE EL PERU. Julián Rodríguez Díez.....	7
ESTUDIO DE LOS MATERIALES ARCILLOSOS EN EL NOR-DESTE DE LA PROVINCIA DE SALAMANCA PARA SU UTILIZACION INDUSTRIAL. Vicente Polo Díez de Solís	121
EVALUACION DE LA ENERGIA SOLAR EFECTIVA EN SALAMANCA. Fernando de Pablo Dávila	169

JULIAN RODRIGUEZ DIEZ



HIDROGEOLOGIA DE LAS CUENCAS DEL ZAPARDIEL Y DE EL PERU

**Provincias
de Avila y Valladolid**

El presente trabajo, titulado «Hidrogeología de las Cuencas del Zapardiel y de El Perú (Prov. de Avila y Valladolid)» estudia, principalmente, la problemática relativa al agua subterránea existente en las Cuencas de los mencionados ríos. En él se realiza un análisis de los recursos hidráulicos y de su posible evolución en el futuro. El tema es de suma importancia para la economía de esta región, que, como es bien sabido, depende fundamentalmente de los riegos con aguas subterráneas.

En la actualidad este tema está siendo objeto de una mayor investigación en mi tesis doctoral, realizada, al igual que este trabajo, en el Departamento de Geomorfología y Geotectónica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Salamanca.

RESUMEN

Se estudia en el presente trabajo, de manera general, la hidrología e hidrogeología de las cuencas del río Zapardiel y del arroyo de El Perú (provincias de Avila y Valladolid).

Se han calculado todos los parámetros representativos del relieve y de la geometría de la cuenca: curva hipsométrica y curva de frecuencias altimétricas, rectángulo equivalente, altitud media, índices de compacidad, de pendiente, de masividad, etc.

En Hidrometeorología se han obtenido y elaborado los datos pluviométricos y termométricos existentes, junto con un análisis crítico acerca del período de duración de las series climáticas. Se hace un estudio de las características climatológicas de la zona, presentando los correspondientes climatogramas, y sus consecuencias morfogenéticas. A continuación, se calcula la evapotranspiración, real y potencial, la lluvia eficaz y los coeficientes de escorrentía. Se estudia la distribución geográfica de estas variables, presentando mapas de isoyetas, isotermas, iso-evapotranspiración, e isolíneas de lluvia eficaz. Hacemos, asimismo, un análisis acerca de la variación de todos estos factores con la altitud, así como la determinación de sus valores medios por el método de los polígonos de Thiessen.

En hidrología superficial se presentan los caudales obtenidos en el río mediante dos campañas de aforos directos, estudiando su variación a lo largo del río. Se hace, igualmente, una estimación del caudal a partir de las variables hidrometeorológicas, comparando ambos resultados.

En geología se hace una recopilación y síntesis de los trabajos realizados hasta el momento en la zona.

En hidrogeología hemos hecho un inventario de puntos de agua, a fin de conocer datos de explotación del acuífero (caudales, profundidades, etc.). Se hacen una serie de consideraciones respecto a la construcción de estas obras de captación.

Hemos llevado a cabo un estudio detallado de la piezometría de la cuenca, junto a las características hidráulicas del acuífero. Presentamos los mapas piezométricos correspondientes a los meses de Abril y Octubre de 1978, un mapa con la variación interanual de estos niveles piezométricos, análisis de varios hidrogramas, etc.

Asimismo, presentamos un mapa de caudales específicos, estableciendo su relación con la transmisividad, deducida en bombeos de ensayo, mediante una ecuación que relaciona ambos parámetros.

Se hace un breve estudio de las características físico-químicas de estas aguas subterráneas mediante una serie de análisis químicos, determinaciones de conductividad, temperatura, etc.

Finalmente, establecemos el posible funcionamiento del sistema acuífero, estudiando también la recarga y descarga del mismo.

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1. INTERES Y OBJETIVOS DEL PRESENTE ESTUDIO

En el presente trabajo estudiaremos la hidrología e hidrogeología de las cuencas del río Zapardiel y del arroyo de El Perú. Ambas cuencas se encuentran en la mitad Sur de la Cuenca del Duero, englobando parte de las provincias de Avila y de Valladolid.

Normalmente, un estudio hidrogeológico se refiere a una cuenca hidrográfica, considerándola como un sistema físico abierto en el que se establece, en un determinado período de tiempo, un balance entre entradas (precipitación, etc.), y salidas (evapotranspiración, etc.), para dar como resultado final la escorrentía total, o volumen de agua aprovechable en la cuenca, bien sea superficial o subterráneamente.

En nuestro caso, en principio, la cuenca hidrográfica no tiene por qué ser considerada como una unidad hidrogeológica, puesto que está formada por materiales terciarios de litología similar a los que forman las cuencas adyacentes, y porque la somera divisoria hidrográfica es un accidente de escasa entidad comparado con la potencia del terciario detrítico. No obstante, y tal como veremos en el capítulo de hidrogeología, no existe ninguna razón para pensar en la existencia de intercambios hídricos con las cuencas vecinas, por lo cual creemos que la zona estudiada puede ser considerada como un sistema hidrogeológico aislado.

El objetivo fundamental del estudio —primero de este tipo que se realiza detalladamente en esta zona— se centra, principalmente, en investigar y evaluar los recursos hidráulicos subterráneos con el fin de conseguir una explotación

adecuada de los mismos, lo que sería de sumo interés debido a la importancia que el agua subterránea tiene en el desarrollo agrícola de esta región.

En primer lugar determinaremos una serie de parámetros representativos del relieve y de la geometría de la cuenca, con el fin de tener un mejor conocimiento de la realidad física de la misma.

Haremos un estudio completo de las precipitaciones y de la evapotranspiración —que a su vez depende de la precipitación y de la temperatura— con el fin de conocer los recursos hidráulicos totales de la cuenca. Estos datos, obtenidos mediante la realización del balance hídrico, se contrastarán, finalmente, con los aforos medidos directamente en el cauce del río.

A continuación, y como objetivo principal del estudio, nos proponemos conocer las posibilidades hidrogeológicas de la región. Con el fin de evaluar los recursos explotables anualmente, estudiaremos con detalle la evolución de los niveles piezométricos. Asimismo, investigaremos los parámetros hidráulicos del acuífero a fin de evaluar los caudales obtenibles en los diversos puntos de la zona en estudio.

Finalmente, y para conocer los posibles usos del agua subterránea, realizaremos un breve estudio de su calidad química.

Hemos de señalar que el presente trabajo se ha realizado paralelamente a la investigación hidrogeológica de la Cuenca del Duero, llevada a cabo por el Instituto Geológico y Minero de España, dentro del Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas.

1.2. METODOS DE TRABAJO

Se han recopilado todos los datos existentes de precipitaciones y temperaturas con el fin de establecer el balance hídrico de la cuenca.

En hidrología superficial, se han realizado dos campañas de aforos directos en el río Zapardiel.

En geología, hemos recopilado los datos existentes tratando de hacer una síntesis de los mismos, desde un punto de vista lito-estratigráfico, en base a su posible comportamiento hidrogeológico.

El trabajo hidrogeológico de campo ha consistido en la realización de un inventario de puntos de agua con la obtención de las correspondientes columnas lito-estratigráficas, merced al control sistemático de las perforaciones que se han ido realizando en la zona. En este inventario de captaciones de agua se anotaban las características constructivas del pozo (profundidad, diámetros de perforación y entubación, etc.), y asimismo se registraba la cota del nivel piezométrico, equipo de bombeo, caudales obtenibles, descensos provocados, etcétera.

Hemos llevado a cabo un control de niveles piezométricos con una periodicidad mensual, en la mayoría de los casos.

Asimismo se han realizado numerosos bombeos de ensayo, a fin de obtener los parámetros hidráulicos del acuífero. Finalmente se realizó una toma de muestras de agua subterránea, para poder determinar sus características físico-químicas.

PROGRAMA DE INVESTIGACIONES DE LA CUENCA

1.1.1.1. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

El objetivo principal de esta investigación es determinar el comportamiento hidrológico de la cuenca de estudio, para poder establecer un modelo matemático que permita predecir el comportamiento de la cuenca en el futuro.

Los objetivos secundarios de esta investigación son: determinar el régimen hidrológico de la cuenca, determinar los parámetros hidráulicos del acuífero, determinar las características físico-químicas del agua subterránea, y determinar el impacto ambiental de la explotación de la cuenca.

Para lograr los objetivos de esta investigación se han realizado los siguientes trabajos: se ha recopilado toda la información disponible sobre la cuenca de estudio, se ha realizado un estudio de campo para determinar el régimen hidrológico de la cuenca, se han realizado bombeos de ensayo para determinar los parámetros hidráulicos del acuífero, se han tomado muestras de agua subterránea para determinar sus características físico-químicas, y se ha realizado un estudio de impacto ambiental de la explotación de la cuenca.

Los resultados de esta investigación se han presentado en el presente informe, el cual constituye el primer volumen de una serie de informes que se irán publicando a medida que se vaya avanzando en el desarrollo de la investigación.

Este informe ha sido elaborado por el personal de la Oficina de Estudios e Investigaciones Científicas, del Instituto de Recursos y Estudios Ambientales, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, en colaboración con el personal de la Oficina de Estudios e Investigaciones Científicas, del Instituto de Recursos y Estudios Ambientales, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

CAPITULO 2

EL COMPLEJO FISIOGRAFICO DE LA CUENCA

2.1. SITUACION GEOGRAFICA Y GENERALIDADES

El presente trabajo, tal como hemos indicado en el capítulo anterior, está referido a las cuencas del río Zapardiel y del arroyo de El Perú, englobando parte de las provincias de Avila y Valladolid.

La Cuenca del Zapardiel tiene una extensión de 1.439 Km², y la de El Perú 206 Km², siendo por tanto la extensión total de la zona estudiada de 1.645 Km². La situación geográfica de la zona estudiada dentro de la Cuenca del Duero, se presenta en la Figura 2.1.1.

El río Zapardiel, afluente del Duero por su margen izquierda, nace al pie de la falda septentrional de la Sierra de Avila, en las proximidades de El Parral (Avila). Sigue en general una dirección S-N, excepto en las cercanías a Mambblas (Avila) donde se desvía ligeramente hacia el NE. Un par de Km. aguas abajo de Medina del Campo (Valladolid) vuelve a tomar la dirección inicial, desembocando en el río Duero, tres kilómetros por debajo de Tordesillas. Tiene una longitud de 97 Km., de los cuales 51 Km. recorre en la provincia de Avila, y el resto en la de Valladolid.

Los límites de la cuenca están formados, al Sur, por las estribaciones de la Sierra de Avila, y a su margen derecha e izquierda, por las cuencas de los ríos Adaja y Trabancos, respectivamente.

El arroyo de El Perú forma una pequeña cuenca que corresponde, aproximadamente, al interfluvio entre las cuencas de los ríos Zapardiel y Adaja. Nace en las proximidades de Rodilana (Valladolid), desembocando a los pocos kilómetros en el río Duero, cerca de Tordesillas.

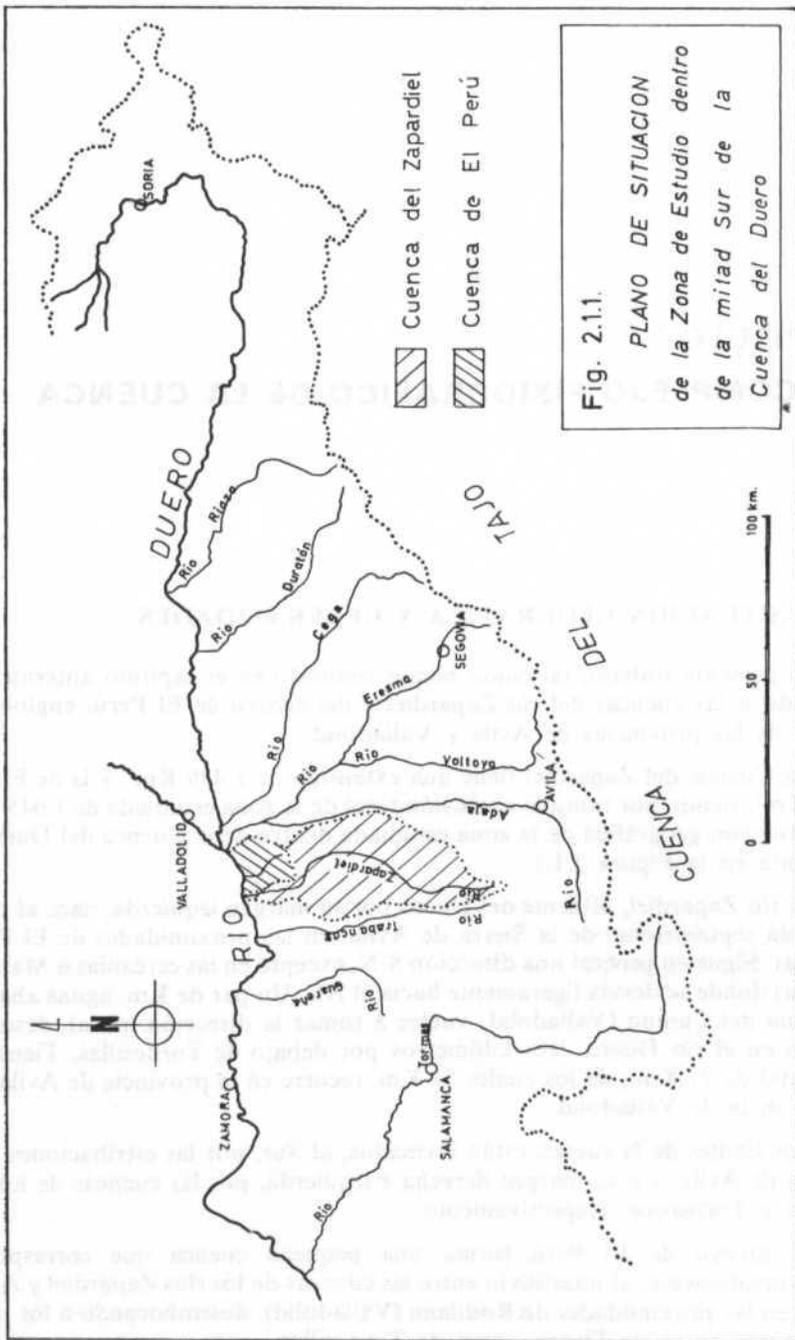


Fig. 2.1.1.

PLANO DE SITUACION
de la Zona de Estudio dentro
de la mitad Sur de la
Cuenca del Duero

El río Zapardiel discurre por una zona topográficamente bastante llana. Alcanza la máxima cota en su nacimiento (1.235 m.), pasando a los pocos kilómetros a la cota de 900 m., a partir de la cual discurre suavemente hasta su desembocadura. No tiene caudal permanente, quedando en gran parte de su trayecto seco durante todo el verano y gran parte del otoño. Los afluentes que tiene son temporales y de escasa importancia.

Como ya hemos dicho, es una zona llana desprovista de arbolado, salvo en reducidas zonas donde existen pinares.

En la Cuenca del Zapardiel son importantes los cultivos de regadío, principalmente la remolacha y la patata. En la de El Perú existen abundantes viñedos que producen vinos de calidad (Serrada, La Seca, etc.).

2.2. HIDROGEOMETRIA

2.2.1. Introducción

La morfología de una cuenca va a tener una gran importancia en el comportamiento hidrológico de la misma.

La influencia de los diversos factores físico-geográficos (topografía, climatología, etc.) que intervienen en un estudio hidrológico no puede reducirse a expresiones puramente matemáticas, pero el estudio de ciertas relaciones puede darnos una idea cualitativa del problema.

En cuanto a las características fundamentalmente geométricas de una cuenca (forma, relieve, etc.), están definidas por una serie de curvas e índices representativos que nos van a servir para conocer su morfología, y a la vez para establecer una comparación con otras cuencas análogas.

Hacemos la observación de que en el presente apartado trabajamos únicamente con la cuenca del Zapardiel, por venir todos estos parámetros geométricos referidos, exclusivamente, a una cuenca determinada.

2.2.2. Método de trabajo

HERAS (1972, p. 351) considera la siguiente distribución para elegir la escala de trabajo de los mapas:

Superficie de la cuenca (Km ²)	Escala
$S < 100$	1: 25.000
$100 < S \leq 1.000$	1: 50.000
$1.000 < S \leq 10.000$	1:200.000
$S > 10.000$	1:500.000

La superficie de la cuenca considerada es de 1.439 Km²; por lo tanto, hemos trabajado a escala 1:200.000, Mapa Militar de España, hojas 4-5 (Salamanca) y 4-4 (Valladolid).

Para determinar la escala a la que debemos obtener la planimetría entre curvas de nivel, HERAS (1972, p. 352) aconseja hallar el cociente:

$$N = \frac{H_M - H_m}{6}$$

siendo:

H_M : cota máxima de la cuenca

H_m : cota mínima de la cuenca

Si N está comprendido entre 100 y 200, tal como sucede en este caso, hay que efectuar la planimetría entre curvas de nivel de 100 en 100 metros.

2.2.3. Obtención de los datos básicos

Los datos básicos a obtener para determinar las características geométricas de una cuenca son:

- Superficie total de la cuenca
- Perímetro de la cuenca
- Superficie entre curvas de nivel

Como ya hemos indicado anteriormente, la superficie de la Cuenca del Zapardiel es de 1.439 Km².

El perímetro de la cuenca es de 193 Km.

La superficie comprendida entre las diferentes curvas de nivel consideradas se presenta a continuación, en la Tabla 2.2.1.

2.2.4. Parámetros representativos del relieve y de la geometría de una cuenca

2.2.4.1. Curva hipsométrica y curva de frecuencias altimétricas

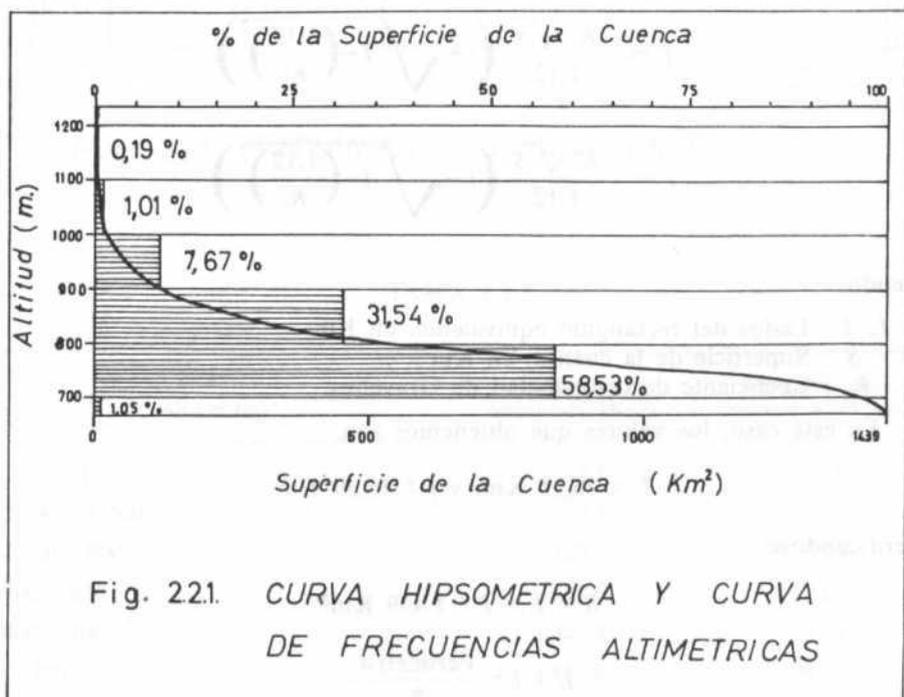
La curva hipsométrica nos da idea de la distribución de la cuenca (en Km², y en % de la superficie total) entre las diferentes curvas de nivel. Representa, por tanto, las superficies que se distribuyen por encima de cada cota.

La curva hipsométrica de la cuenca considerada (Fig. 2.2.1.), nos da en abscisas, la superficie de la cuenca y el tanto por ciento de la superficie total que se halla por encima de las cotas de altura, representadas en ordenadas.

En el mismo gráfico se ha representado asimismo la curva de frecuencias altimétricas, que expresa, con un diagrama escalonado, las superficies (en Km² y en %) en abscisas, comprendidas entre las distintas curvas de nivel, representadas en ordenadas.

TABLA 2.2.1.
 SUPERFICIES COMPRENDIDAS ENTRE LAS CURVAS DE
 NIVEL CONSIDERADAS

Altitud (m)	Superficie (Km ²)
> 1.100	2,8
1.100 - 1.000	14,5
1.000 - 900	110,4
900 - 800	453,9
800 - 700	842,3
< 700	15,1
Total	1.439



Como se puede observar, aproximadamente el 90 % de la superficie total de la cuenca está comprendida entre 700 y 900 metros de altitud, estando asimismo, casi el 60 % de la superficie total comprendida entre 700 y 800 metros, lo cual nos indica que se trata de una cuenca, topográficamente, bastante homogénea.

2.2.4.2. *Altitud media*

A partir de la curva hipsométrica podemos conocer la altitud media de la cuenca, definida por la ordenada media de dicha curva. Se obtiene, por tanto, dividiendo la integral de la mencionada curva, calculada por planimetría, por el incremento de abscisa (altura máxima — altura mínima).

La altitud media sobre el nivel del mar de la cuenca estudiada, calculada de este modo, es de 780 metros.

2.2.4.3. *Rectángulo equivalente*

Se supone que la escorrentía de una cuenca determinada es aproximadamente la misma, a igualdad de condiciones climatológicas, que un rectángulo de igual superficie y perímetro, teniendo por tanto el mismo coeficiente de compacidad de Gravelius (punto 2.2.4.4.).

Conociendo el perímetro y el área de la cuenca, podemos conocer los dos lados del rectángulo equivalente, mediante las fórmulas:

$$L = \frac{K_c \sqrt{S}}{1,12} \left(l + \sqrt{l - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right)$$

$$l = \frac{K_c \sqrt{S}}{1,12} \left(l - \sqrt{l - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right)$$

siendo:

L, l : Lados del rectángulo equivalente, en Km.

S : Superficie de la cuenca, en Km².

K_c : Coeficiente de compacidad de Gravelius.

En este caso, los valores que obtenemos son:

$$L = 78,25 \text{ Km. y } l = 18,39 \text{ Km.}$$

verificándose:

$$S = L \times l = 1.439 \text{ Km}^2$$

$$L + l = \frac{\text{Perímetro}}{2}$$

de donde, efectivamente, $P = 193 \text{ Km}$.

El rectángulo equivalente está representado en la Figura 2.2.2., y en él las curvas de nivel vienen dadas por rectas paralelas a la base menor. Estas distancias entre curvas de nivel, llevadas sobre el lado mayor del rectángulo, se obtienen dividiendo la superficie acumulada por encima de cada cota, por el lado menor del rectángulo, tal como veremos a continuación en la Tabla 2.2.2.

2.2.4.4. Índice de compacidad

La forma de una cuenca va a tener una influencia directa en la escorrentía de la misma. Dicha forma va a venir definida por el coeficiente de compacidad de

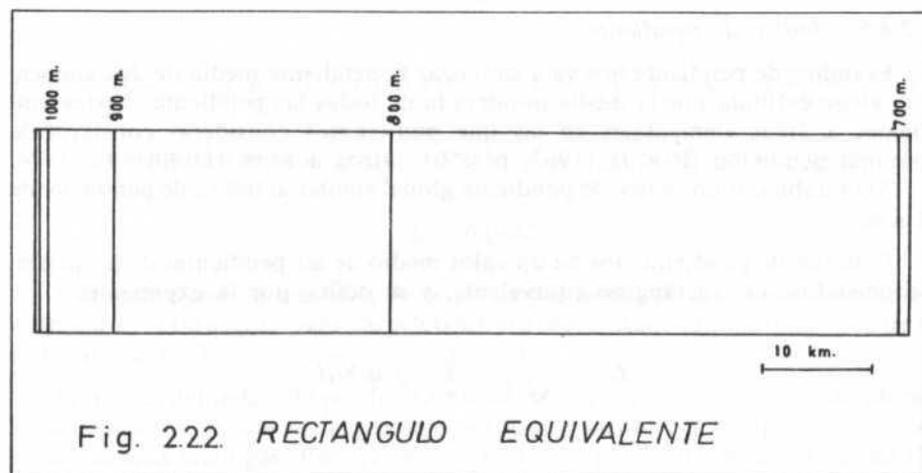


TABLA 2.2.2.

Altitud (m)	Superficies acumuladas (Km ²)	Distancias entre curvas de nivel (Km.)
> 1.100	2,8	0,15
1.100 - 1.000	17,3	0,95
1.000 - 900	127,7	6,95
900 - 800	581,6	31,63
800 - 700	1.423,9	77,43
< 700	1.439,0	78,25

Gravelius (K_c), que es la relación existente entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de área equivalente.

$$K_c = \frac{\text{Perímetro}}{2 \sqrt{\eta \cdot S}}$$

Este coeficiente es mayor que la unidad, y será más próximo a la unidad cuando la cuenca se aproxime a la forma circular, y más alejado de ella cuando la cuenca tenga una forma más irregular en relación con el círculo.

Aplicando la fórmula indicada anteriormente a la cuenca aquí estudiada, obtenemos un $K_c = 1,437$, con lo cual observamos que dicha cuenca se aleja bastante de tener una forma circular.

2.2.4.5. Índice de pendiente

El índice de pendiente nos va a sintetizar la pendiente media de una cuenca, que viene definida por la media ponderada de todas las pendientes correspondientes a áreas elementales en las que pudiéramos considerar constante la máxima pendiente (ROCHE, 1963, p. 150). Otros autores (DUBREUIL, 1974, p. 151) establecen un índice de pendiente global similar al índice de pendiente de Roche.

El índice de pendiente nos da un valor medio de las pendientes de la cuenca, deduciéndose del rectángulo equivalente, y se define por la expresión:

$$I_p = \frac{l}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{a_i \times d_i}$$

TABLA 2.2.3.

Altitud (m)	Superficie (Km ²)	Superficie total (Km ²)
1.235 - 1.100	2,8	0,19
1.100 - 1.000	14,5	1,01
1.000 - 900	110,4	7,67
900 - 800	453,9	31,54
800 - 700	842,3	58,53
700 - 670	15,1	1,05
Total	1.439	99,99

- I_p : Índice de pendiente.
- L : Longitud del lado mayor del rectángulo equivalente.
- a_i : Área comprendida entre dos curvas de nivel en tanto por uno del área total de la cuenca.
- d_i : Equidistancia de las curvas de nivel.
- n : Número de curvas de nivel existentes en el rectángulo, incluidos los extremos.

Las superficies comprendidas entre las distintas curvas de nivel, expresadas en tanto por uno de la superficie total, son las que figuran en la Tabla 2.2.3.

Sustituyendo los valores de dicha tabla en la fórmula anterior, tenemos:

$$L = 78,25 \text{ Km.}$$

$$I_p = \frac{l}{\sqrt{78,25}} (\sqrt{0,135 \times 0,0019} + \sqrt{0,1 \times 0,0101} + \sqrt{0,1 \times 0,0767} + \sqrt{0,1 \times 0,3154} + \sqrt{0,1 \times 0,5853} + \sqrt{0,03 \times 0,0105}) = 0,0647$$

$$I_p = 0,0647$$

Este índice nos da una idea de la pendiente media de la cuenca, aunque así definida es insuficiente para caracterizar el relieve desde el punto de vista de la erosión del Suelo.

El interés del índice de pendiente, junto con los coeficientes que se calcularán a continuación, reside principalmente en poder establecer comparaciones con otras cuencas análogas. Por ejemplo, el índice de pendiente de la cuenca del río Almar es 0,1306 (SANCHEZ SAN ROMAN, 1975), es decir, que aunque se trata de una cuenca vecina de similares características, tiene una pendiente media dos veces superior que la cuenca del río Zapardiel.

2.2.4.6. Coeficiente de masividad

El coeficiente de masividad nos da una idea de la pendiente de la cuenca, diferenciando cuencas que tengan la misma altura media, e inversamente, que la altura media diferencia cuencas que tengan el mismo coeficiente de masividad.

El coeficiente de masividad es el resultado de dividir la altura media de una cuenca por su superficie proyectada. El coeficiente de masividad de la cuenca en estudio es el siguiente:

$$I_m = \frac{780 - 670}{1439} = 0,08$$

El índice de masividad tiene una ecuación de dimensión L^{-1} , ya que es el resultado de dividir una longitud por una superficie, por lo que se ha hecho

conveniente utilizar un coeficiente adimensional, que estudiaremos en el punto siguiente.

2.2.4.7. Coeficiente orográfico

El coeficiente orográfico de una cuenca se calcula multiplicando el índice de masividad por la altura media de dicha cuenca, con lo cual obtenemos un coeficiente adimensional.

$$C_0 = I_m \times H = 0,08 \times 110 = 8,8$$

De esta manera estamos considerando un coeficiente en el que se ponen de manifiesto las dos variables esenciales del relieve de una cuenca: su altura media, que influye sobre la energía potencial del agua, y su pendiente, que actúa sobre la escorrentía.

FOURNIER (1960, pp. 147-150) estudiando numerosas cuencas del mundo establece un valor del coeficiente orográfico igual a 6, valor a partir del cual la erosión se va a comportar de distinta manera frente a la pluviometría.

2.2.4.8. Pendiente media del río

La pendiente media de un río se define por la expresión:

$$I_r = \frac{H_M - H_m}{1000 L}$$

siendo:

I_r : Pendiente media del río.

H_M, H_m : Cotas máxima y mínima de la cuenca, en m.

L : Longitud del río, en Km.

La pendiente media del río Zapardiel es, por tanto, 0,0058.

CAPITULO 3

ESTUDIO DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA HIDROGEOLOGICO

3.1. HIDROMETEOROLOGIA

3.1.1. Precipitaciones

3.1.1.1. *Introducción*

La precipitación constituye el factor esencial del ciclo hidrológico, ya que es la materia prima del referido ciclo.

En el concepto de precipitación englobaremos todo el agua, en estado sólido o líquido, que llega a la superficie de la tierra.

La lluvia, obviamente, es el tipo de precipitación que tiene mayor interés en hidrología, debido a su importancia sobre cualquier otro tipo de precipitaciones: nieve, rocío, etc.

La medida de la lluvia se hace mediante pluviómetros y pluviógrafos, que registran la altura que alcanzaría el agua sobre una ideal superficie plana y horizontal, antes de sufrir pérdidas (evaporación, infiltración, etc.).

3.1.1.2. *Obtención y elaboración de los datos básicos meteorológicos*

Hemos reunido las observaciones pluviométricas procedentes de los boletines mensuales y de los resúmenes anuales del I.N.M., así como de GARMENDIA (1972), de 29 estaciones pluviométricas repartidas geográficamente por toda la zona o en las proximidades de la misma. Algunas de las lagunas que aparecen en

las publicaciones anteriormente citadas se han completado con los datos procedentes del Centro Meteorológico del Duero.

Hemos de apuntar que la gran mayoría de estos datos no provienen de pluviógrafos o de observadores profesionales, por lo que de hecho pueden estar afectados de errores importantes, próximos al 10 % (SANCHEZ SAN ROMAN, 1975), debidos a la ubicación de los pluviómetros, lectura de medidas, etc.

El primer problema que se plantea es la homogeneización de todos estos datos, sobre todo si tenemos en cuenta que aproximadamente el 50 % de las estaciones consideradas no alcanzan un período de observación superior a los 10 ó 15 últimos años.

El período de homogeneización considerado ha sido desde el año (hidrológico) 1953-54 hasta 1972-73, es decir, 20 años.

El problema de homogeneización que planteábamos anteriormente, lo hemos resuelto mediante el método de «dobles acumulaciones», con el fin de completar los datos no disponibles en alguna estación, durante el período citado. Dicho método consiste en calcular un coeficiente de proporcionalidad entre dos estaciones próximas, una completa y otra incompleta. Se aconseja que el número de años de la estación a comparar con la estación tipo, no sea inferior a 10 años (HERAS, 1970, p. 28).

Por ejemplo, de la estación de la Zarza solamente disponíamos de datos a partir del año 1961-62, con lo que elegimos la estación de Matapozuelos, cercana, de la cual disponíamos de toda la serie completa. Los valores correspondientes a los años comunes a las dos estaciones los comparamos por «dobles acumulaciones» del siguiente modo:

Años	^P La Zarza	^P Matapozuelos
61-62	526,2	500,5
61-62 + 62-63	921,2	826,6
61-62 + ... + 72-73	5018,0	5239,3

Representando gráficamente estos valores (Figura 3.1.1.) observamos que existe una relación aproximadamente constante entre ambas estaciones, siendo:

$$^P \text{ La Zarza} = ^P \text{ Matapozuelos} \times 0,98$$

De este modo podemos calcular la pluviometría de un año determinado en La Zarza a partir de la pluviometría correspondiente a ese mismo año en la estación de Matapozuelos.

Por este método se han completado las series pluviométricas correspondientes a 16 estaciones.

Podemos observar en el ejemplo anterior que el coeficiente de proporcionalidad calculado, para dos estaciones cercanas, es bastante próximo a la

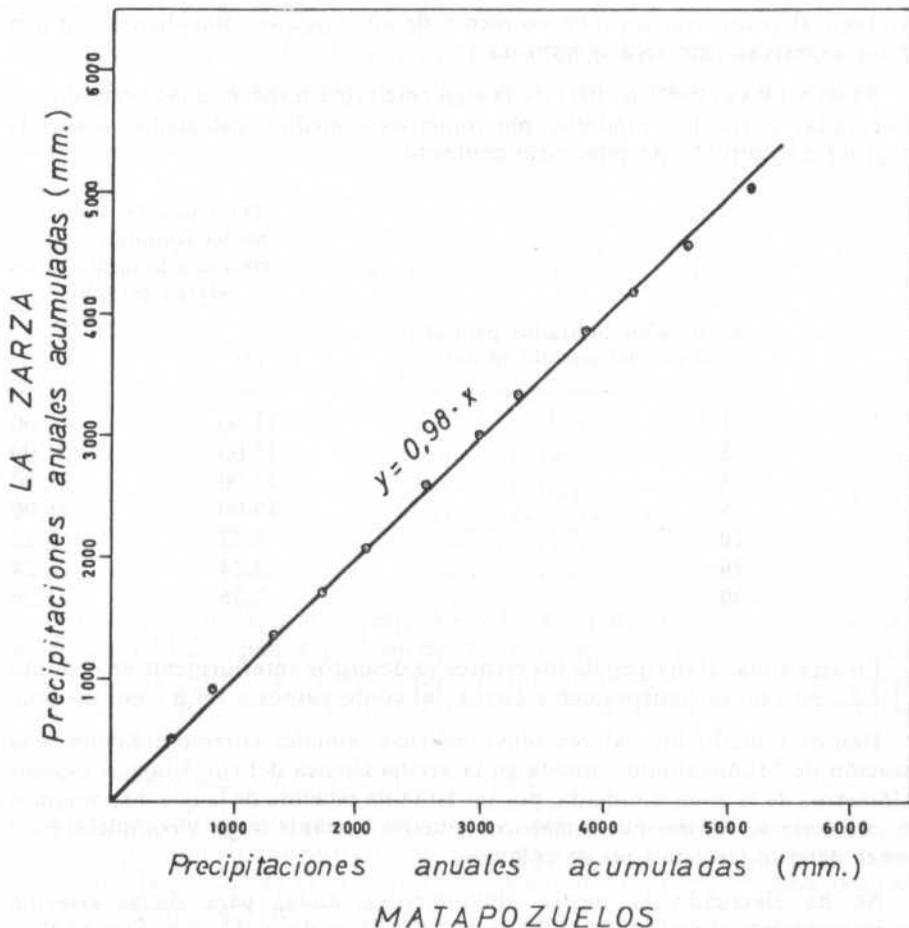


Fig. 311. METODO DE "DOBLES ACUMULACIONES"

unidad. Esto va a suceder entre todas las parejas de estaciones consideradas para aplicar este método de «dobles acumulaciones». Esto es debido, tal como veremos en los subapartados siguientes, a la poca variación existente en la pluviometría en toda la zona estudiada.

3.1.1.3. Consideraciones respecto al período de duración de las series climáticas

La O.M.M. recomienda trabajar con series climáticas no menores de 30 años consecutivos de observaciones, con el fin de evitar errores que se pueden

producir al considerar un número menor de años quizás coincidentes con una época excesivamente seca o húmeda.

REMENIERAS (1965, p. 101) da la siguiente tabla respecto a las desviaciones observadas entre los módulos pluviométricos medios calculados según la longitud del período de referencia utilizado:

Nº de años utilizados para el cálculo del módulo medio	Diferencia en % de la media considerada con relación a la media de un «largo período»	
	(+)	(-)
1	51,00	40,00
2	35,00	31,00
3	27,00	25,00
5	15,00	15,00
10	8,22	8,22
20	3,24	3,24
30	2,26	2,26

En esta zona, al margen de los errores ya descritos anteriormente en el punto 3.1.1.2., ésto no es rigurosamente cierto, tal como vamos a ver a continuación.

Hemos tomado los valores pluviométricos anuales correspondientes a la estación de Muñogalindo, situada en la vecina cuenca del río Adaja, a escasos kilómetros de la zona estudiada, por ser ésta una estación de la que disponíamos de una serie de valores pluviométricos anuales bastante larga y completa, para poder determinar este tipo de cálculos.

Se ha efectuado la media pluviométrica anual para dicha estación correspondiente al período 1931-32 hasta 1972-73, es decir, 42 años. Siendo $P_{42} = 435,9$ mm.

A continuación, y tal como se expresa en la Tabla 3.1.1., se ha calculado la media anual para 5, 10, 15, 20, y 30 años consecutivos más húmedos o más secos, con los correspondientes errores respecto a la media de 42 años.

En la tabla citada podemos observar que el error que se comete al considerar series de 20 años es muy semejante al error cometido al trabajar con 30 años. Para la serie de 15 años este error se hace ligeramente mayor, oscilando entre un 6,3 % para el período más húmedo y un 1,4 % para el período más seco. Si pasamos a considerar un período de 10 años el error es próximo al 11 %. Y, por último, si consideramos un período de 5 años únicamente, este error se hace mayor, y pasa a ser aproximadamente del 20 %.

Concluyendo, podemos considerar, tal como indicábamos al principio de este punto, que el error que se comete, en esta zona, al trabajar con series de 20

TABLA 3.1.1.
DESVIACION EN EL MODULO PLUVIOMETRICO, SEGUN LA
LONGITUD DEL PERIODO DE REFERENCIA UTILIZADO

Nº de años consecutivos	Valor del módulo medio		% de la media (435,9 mm.)	
	Período más húmedo	Período más seco	Período más húmedo	Período más seco
30	453,8	431,8	4,106	0,941
20	456,4	430,5	4,703	1,239
15	463,3	429,7	6,286	1,422
10	484,0	385,8	11,035	11,493
5	521,2	349,7	19,569	19,775

años en vez de 30 años, es muy pequeño: del 4-5 % para el período de años más húmedo, y del 1-2 % para el período de años más secos. Errores, como ya hemos indicado, muy pequeños, comparados con los errores producidos por la baja precisión de estas medidas, al no provenir estos datos de observadores profesionales.

3.1.1.4. *Presentación de los datos obtenidos*

Tal como indicábamos en el punto 3.1.1.2., hemos considerado un total de 29 estaciones pluviométricas distribuidas geográficamente por toda la zona, o en sus proximidades, siendo el período seleccionado desde el año 1953-54 hasta el año 1972-73, un total de 20 años.

Solamente existen en toda la zona 13 estaciones para las cuales se disponga de datos pluviométricos correspondientes, al menos, al período considerado. Para el resto de las estaciones, un total de 16, únicamente disponíamos de valores correspondientes a un período de observación igual o menor de 13 años, habiéndose completado por el método de dobles acumulaciones, anteriormente expuesto.

A continuación, en la Tabla 3.1.2. se presentan estos valores, con las correspondientes altitudes sobre el nivel del mar.

3.1.1.5. *Variación de la pluviometría con la altitud*

REMENIERAS (1965, p. 132) señala que, por regla general, aunque las anomalías son numerosas, la pluviosidad aumenta con la altura de la cuenca hasta una cierta elevación, llamada la «óptima pluvial», a partir de la cual decrece.

TABLA 3.1.2.
 PLUVIOMETRIAS ANUALES MEDIAS PARA EL PERIODO 1953-54
 HASTA 1972-73

Número	Estación	Altitud (m.)	P (mm.)
1	Arévalo	820	392
2	Ataquines	802	363
3	Cabezas de Alambre	902	362
4	Cillán	1.212	577
5	Crespos	924	(418)
6	El Campillo	748	(392)
7	Fontiveros	885	(421)
8	Fresno el Viejo	761	389
9	Fuente el Sol	758	(351)
10	La Seca	733	419
11	La Zarza	760	(426)
12	Lomoviejo	769	(339)
13	Madrigal de las A. Torres	808	387
14	Matapozuelos	740	435
15	Medina del Campo	721	409
16	Muñogrande	944	(433)
17	Narros del Castillo	955	(403)
18	Nava del Rey	748	413
19	Olmedo	771	446
20	Palacios de Goda	820	(379)
21	Pollos	684	(401)
22	Rasueros	834	(392)
23	Rivilla de Barajas	903	(436)
24	Salvados	951	(406)
25	Tordesillas	670	436
26	Torrecilla de la Abadesa	691	429
27	Valdestillas	699	(427)
28	Villamarciel	680	(447)
29	Villanueva del Aceral	846	(386)

() : Medias iguales o menores a trece datos anuales completados por «dobles acumulaciones».

Hemos representado en un gráfico (Fig. 3.1.2.) la variación de la pluviometría media anual con la altitud, para los valores correspondientes a las estaciones consideradas en el punto anterior.

Según se puede observar, en este caso, no hay una relación directa pluviometría-altitud, si exceptuamos cotas superiores a 775 m. aproximadamente, donde existe una relación dada por la ecuación

$$P = 0,46. \text{ altitud} - 0,12$$

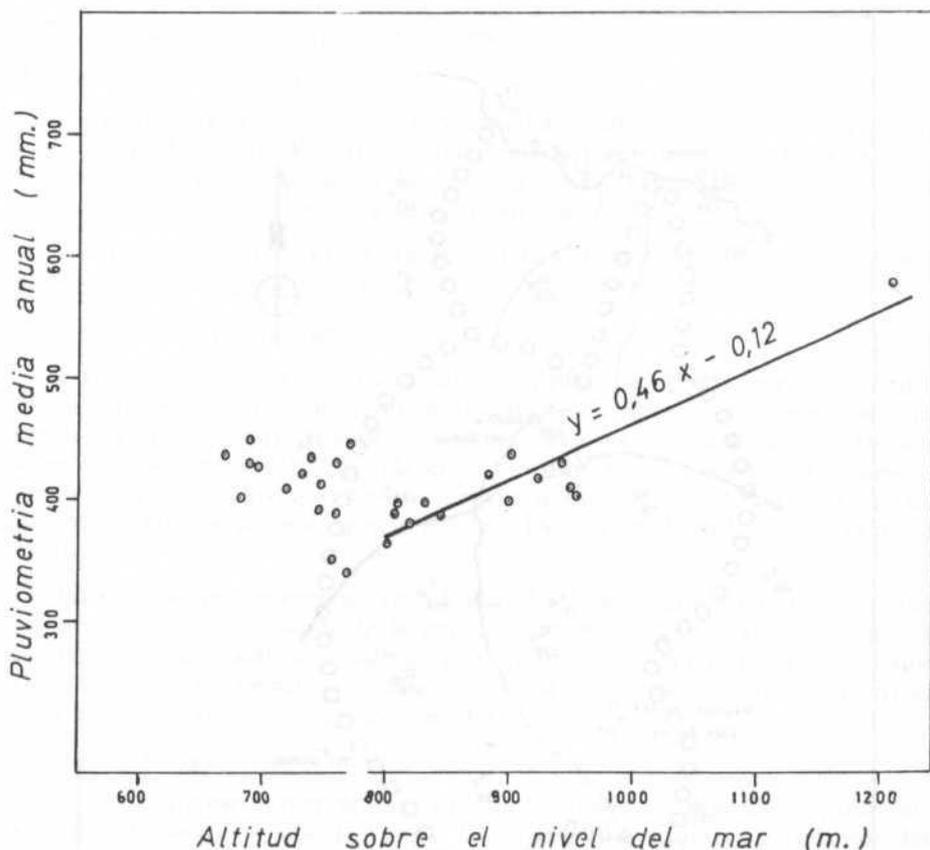


Fig. 3.12. VARIACION DE LA PLUVIOMETRIA
CON LA ALTITUD

con $r = 0,91$, lo que indica una relación bastante buena. Resulta imposible buscar la ecuación de una recta para cotas inferiores a los 775 metros. Tal como veremos más adelante en el mapa de isoyetas (Figura 3.1.3.), existe una franja aproximadamente horizontal en el centro de la cuenca correspondiente a una zona de menos precipitación, que no corresponde a la parte más baja de la cuenca.

En general, toda la zona es muy semejante pluviométricamente, oscilando las lluvias entre valores próximos a los 350 y 450 mm., si exceptuamos la estación de Cillán (577 mm.) que está situada algo más al Sur de la zona estudiada.

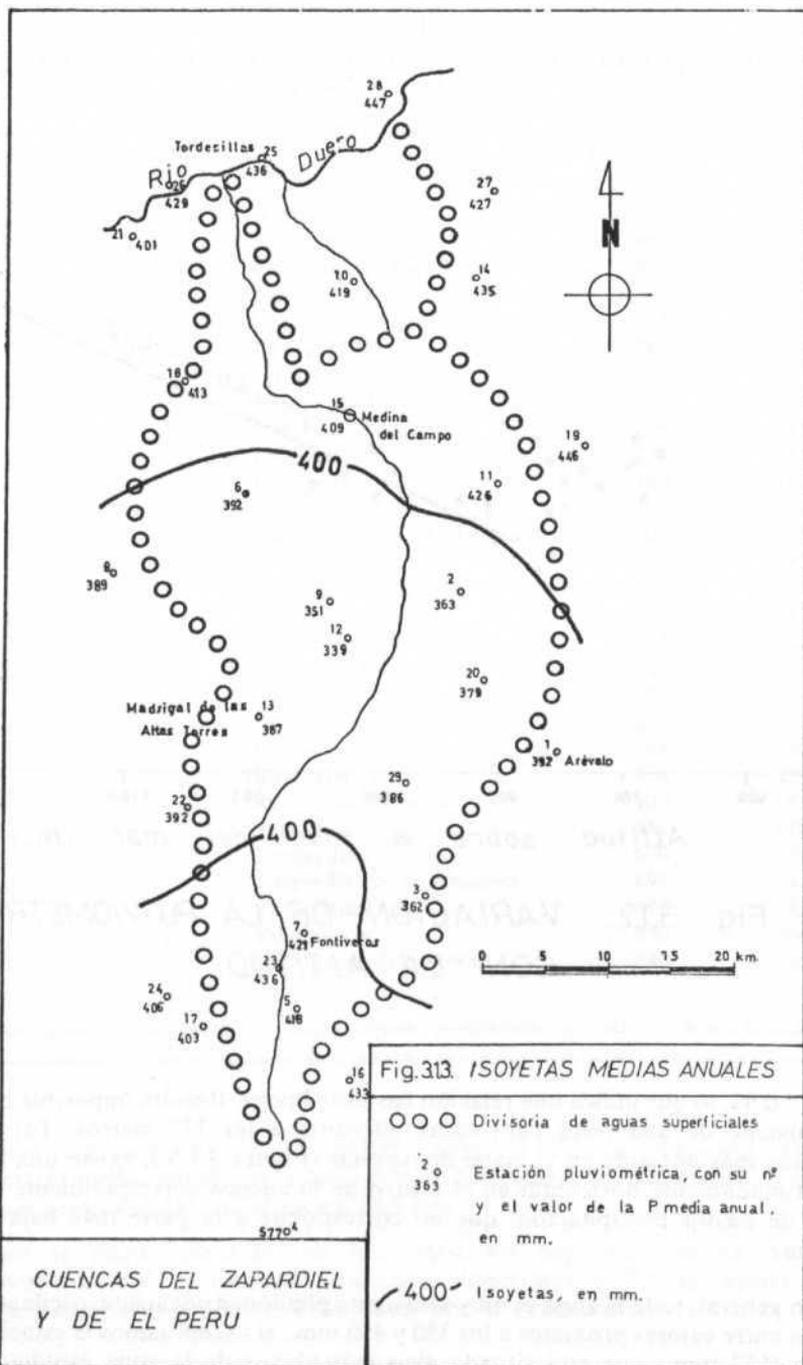


Fig.313. ISOYETAS MEDIAS ANUALES

- ○ ○ Divisoria de aguas superficiales
- 2
363 Estación pluviométrica, con su nº y el valor de la P media anual, en mm.
- 400 — Isoyetas, en mm.

CUENCAS DEL ZAPARDIEL
Y DE EL PERU

3.1.1.6. Cálculo de la pluviometría media y volumen de agua precipitada

3.1.1.6.1. Introducción

Para efectuar el cálculo de la lluvia media en una zona determinada existen varios procedimientos. El método más simple, y menos aproximado, consiste en tomar como lluvia media de la zona la media aritmética de las medidas obtenidas en los pluviómetros situados en ellas.

Existen otros métodos más exactos, como son el trazado de curvas isoyetas y el método de los polígonos de Thiessen, que vamos a ver a continuación.

3.1.1.6.2. Curvas isoyetas

Este método consiste en interpolar en un plano, en el que tenemos situados los pluviómetros y las respectivas cantidades de lluvia recogidas, líneas de igual precipitación (isoyetas), de acuerdo con estos valores. Después, calcularíamos la superficie de cuenca comprendida entre dos isoyetas consecutivas y se admite que la altura de las precipitaciones en esa superficie elemental es la media de los valores de las dos isoyetas que la limitan. De este modo hallaríamos la lluvia media.

Tal como se puede apreciar en la Figura 3.1.3., en la que se han representado las isoyetas medias anuales de la zona, solamente se puede trazar la isoyeta correspondiente a 400 mm., debido a la uniformidad pluviométrica existente. Debido a esto, no hemos considerado, en este caso, este método el más eficaz para hacer el cálculo de la lluvia media.

3.1.1.6.3. Polígonos de Thiessen

Consiste este método en asignar a cada pluviómetro la superficie equivalente a la de un polígono que le rodea. Los polígonos se dibujan trazando las mediatrices de los segmentos que unen un determinado pluviómetro con los pluviómetros más próximos. En los polígonos limítrofes solamente consideraremos el área interior de la zona, teniendo en cuenta para su dibujo los pluviómetros exteriores.

El cálculo de la lluvia media se efectúa del siguiente modo:

$$P_m : \frac{P_1 S_1 + P_2 S_2 + \dots + P_n S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}$$

siendo:

P_1, P_2, \dots, P_n : Módulos pluviométricos medios para las n estaciones.

S_1, S_2, \dots, S_n : Superficie asignada a cada polígono.

Hemos considerado este método el más adecuado para calcular la lluvia media caída en la zona, por ser el más exacto para hacer este tipo de cálculos en zonas llanas con una pluviometría de distribución bastante homogénea (CUSTODIO Y LLAMAS, 1976, p. 303), tal como sucede en este caso.

TABLA 3.1.3.

CALCULO DE LA PLUVIOMETRIA MEDIA ANUAL POR EL METODO DE
LOS POLIGONOS DE THIESEN

Número	Estación	Cuenca del Zapardiel			Cuenca de El Perú		
		P media anual (mm.)	Superficie asignada (Km ²)	Volumen precip. (Hm ³)	P media anual (mm.)	Superficie asignada (Km ²)	Volumen precip. (Hm ³)
1	Arévalo	392	12,8	5,0			
2	Ataquines	363	97,2	35,3			
3	Cabezas de Alambre	362	52,8	19,1			
4	Cillán	577	10,0	5,8			
5	Crespos	418	43,4	18,1			
6	El Campillo	392	126,8	49,7			
7	Fontiveros	421	101,2	42,6			
8	Fresno el Viejo	389	28,8	11,2			
9	Fuente el Sol	351	102,8	36,1			
10	La Seca	419	20,0	8,4	419	123,6	51,8
11	La Zarza	426	92,4	39,4			
12	Lomoviejo	339	64,4	21,8			
<hr/>							
13	Madrigal de las A. Torres	387	101,4	39,2			
14	Matapozuelos	435	4,2	1,8	435	13,8	6,0
15	Medina del Campo	409	144,2	59,0	409	4,2	1,7
16	Muñogrande	433	4,8	2,1			
17	Narros del Castillo	403	19,6	29,7			
18	Nava del Rey	413	72,0	7,9			
19	Olmedo	446					
20	Palacios de Goda	379	82,0	31,1			
21	Pollos	401	7,2	2,9			
22	Rasueros	392	61,6	24,1			
23	Rivilla de Barajas	436	39,6	17,2			
24	Salvados	406	2,4	0,9			
25	Tordesillas	436	9,6	4,2	436	30,4	13,2
26	Torreçilla de la Abadesa	429	6,4	2,7			
27	Valdestillas						
28	Villamarciel				427	5,6	2,4
29	Villanueva del Aceral	386	131,6	50,8	447	28,4	12,7
<hr/>							
Total			1.439,2	566,1		206,0	87,8

P media anual Cuenca del Zapardiel (Vol./Sup.)

P media anual Cuenca de El Perú (Vol./Sup.)

P media anual de toda la zona (Vol./Sup.)

393,3 mm. = 566,1 Hm³

426,2 mm. = 87,8 Hm³

397,4 mm. = 653,9 Hm³

En la Figura 3.1.4. presentamos los polígonos de Thiessen, trazados de acuerdo con lo expuesto anteriormente.

En la Tabla 3.1.3. se presenta la planimetría de las superficies correspondientes a cada polígono, con el cálculo del volumen de agua precipitada y el valor de la precipitación media anual.

Podemos ver, por tanto, que la pluviometría media anual en toda la zona es, aproximadamente, de 400 mm., oscilando el volumen de agua precipitada anualmente entre los 600 y 700 Hm³.

3.1.2. Temperaturas

3.1.2.1. Introducción

En el estudio hidrológico de una cuenca es necesario hacer un análisis de sus características térmicas, ya que la temperatura, junto con otros fenómenos climatológicos (radiación, presión, humedad, viento, etc.), es el principal factor que influye sobre la evapotranspiración.

3.1.2.2. Obtención y elaboración de los datos termométricos

Hemos reunido las observaciones termométricas procedentes de los boletines mensuales y de los resúmenes anuales del I.N.M., junto con los datos de GARMENDIA (1972) y del I.N.I.A. (1973).

En la Tabla 3.1.4. se presentan las temperaturas medias anuales de 19 puntos de la zona junto con su correspondiente altitud (1).

En las estaciones donde ha sido posible se han recogido también datos de las temperaturas medias mensuales, con el fin de poder hacer un estudio de la evapotranspiración mes a mes, tal como veremos más adelante en el apartado 3.2.

Como ya sabemos, la temperatura es esencialmente función de la altitud, existiendo un gradiente térmico vertical de variación de la temperatura con la altitud. Esta relación temperatura-altitud la hemos expresado, en nuestra zona, mediante la ecuación:

$$T_m = 15,3 - 4,6 \times H \times 10^{-3}$$

siendo:

T_m = Temperatura media anual en 0 °C, de un determinado punto de la zona.

H = Altitud sobre el nivel del mar, en metros, de ese mismo punto.

(1) Se ha conservado, de ahora en adelante, el número dado a cada estación en la Tabla 3.1.2., con el fin de no inducir a error.

TABLA 3.1.4.
TEMPERATURAS MEDIAS ANUALES

Número	Estación	Altitud (m)	Ta. (°C)
1	Arévalo	820	11,7
2	Ataques	802	11,6
3	Cabezas de Alambre	902	11,3
4	Cillán	1.212	9,8
5	Crespos	924	10,9
6	El Campillo	748	11,7
7	Fontiveros	885	11,2
8	Fresno el Viejo	761	11,8
13	Madrigal de las A. Torres	808	11,6
15	Medina del Campo	721	11,8
16	Muñogrande	944	10,8
17	Narros del Castillo	955	10,8
18	Nava del Rey	748	11,8
19	Olmedo	771	11,7
21	Pollos	684	12,2
22	Rasucos	834	11,4
25	Tordesillas	670	12,3
27	Valdestillas	699	12,0
29	Villanueva del Aceral	846	11,4

Mediante esta ecuación hemos obtenido las temperaturas medias anuales de aquellos puntos de los que no disponíamos de datos suficientes. Se ha comprobado que el máximo error que se comete al aplicar la fórmula anterior a las estaciones de las que se dispone de datos es de $\pm 0,2$ °C.

En la Figura 3.1.5. se presenta un mapa de isotermas medias anuales, basado en los datos presentados en la Tabla 3.1.4.

Podemos observar que la temperatura media anual en la zona oscila entre valores muy próximos a los 11-12 °C.

3.1.3. Características climatológicas

Con el fin de determinar las características climatológicas de la zona en estudio, hemos representado gráficamente los climatogramas correspondientes a tres puntos de la misma. Para esto, dentro de las observaciones mensuales de precipitación y temperatura disponibles, hemos procurado elegir los datos correspondientes a tres puntos (Tabla 3.1.5.), que estuvieran distribuidos geográficamente por toda la zona: Medina del Campo, situado en la mitad Norte; Arévalo, aproximadamente en la margen derecha de la zona Central; y Cabezas de Alambre, situado en la mitad Sur.

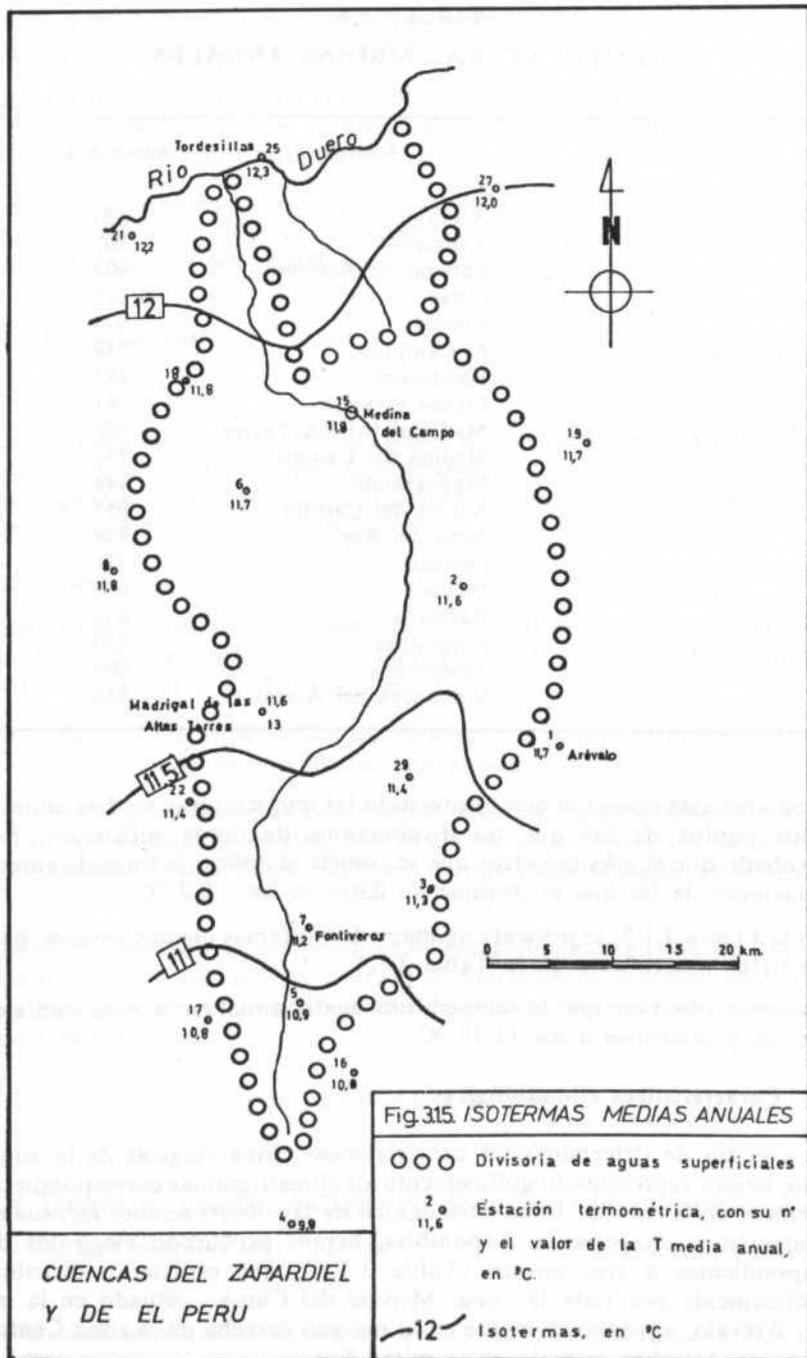


TABLA 3.1.5.
 DATOS MENSUALES MEDIOS DE P (mm.) y T_a (°C)

CABEZAS DE ALAMBRE											
Oc.	Nv.	Dc.	En.	Fb.	Mz.	Ab.	My.	Jn.	Jl.	Ag.	St.
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
P	37,6	31,8	39,1	30,6	25,2	40,0	30,7	34,3	16,5	11,1	39,1
T	11,3	6,3	3,5	3,0	4,0	7,1	13,4	17,7	21,1	21,0	17,5
AREVALO											
Oc.	Nv.	Dc.	En.	Fb.	Mz.	Ab.	My.	Jn.	Jl.	Ag.	St.
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
P	37,5	35,3	42,9	28,2	42,7	39,7	42,6	30,6	17,6	13,3	31,9
T	12,8	7,5	2,2	3,6	6,6	9,3	15,3	17,8	21,7	20,9	18,6
MEDINA DEL CAMPO											
Oc.	Nv.	Dc.	En.	Fb.	Mz.	Ab.	My.	Jn.	Jl.	Ag.	St.
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
P	40,5	39,8	42,4	34,8	30,9	40,7	44,1	33,7	16,1	16,9	32,1
T	12,8	7,0	3,7	2,9	4,3	8,1	10,9	13,8	18,4	21,7	17,6

Un climatograma (PEGUY, 1970, p. 440) es un gráfico en el que se representan, en abscisas la precipitación mensual media, y en ordenadas la correspondiente temperatura mensual media, con lo que obtenemos una línea quebrada, que nos va dando las variaciones de precipitación y temperatura a lo largo de los doce meses del año.

De este modo, hemos representado los climatogramas correspondientes a los tres puntos citados anteriormente (Figura 3.1.6.).

En estos climatogramas apreciamos claramente la existencia de dos dominios: un dominio vertical, y otro inclinado hacia la izquierda y hacia arriba.

El dominio vertical corresponde a una variación importante de la temperatura y escasa variación de la precipitación, lo que caracteriza una influencia climática continental.

El dominio que está inclinado hacia la izquierda y hacia arriba corresponde con un aumento de temperatura y una disminución de la precipitación, lo que evidencia una influencia climática de tipo mediterráneo.

En el climatograma número 1 la inflexión a la izquierda y hacia arriba comienza en junio y termina en septiembre, mientras que en los climatogramas nº 2 y nº 3 esta inflexión se produce de mayo a octubre. Esto significa que en la zona correspondiente a estos dos últimos climatogramas existe una influencia de carácter mediterráneo desde mayo a octubre, existiendo el resto del año un carácter climático continental, mientras que en la zona correspondiente al climatograma nº 1 el dominio mediterráneo irá desde junio a septiembre, teniendo el resto del año, igualmente, un carácter continental.

En la mitad Sur de la zona de estudio (climatograma nº 1) el período de influencia del clima mediterráneo se hace más corto (desde junio a septiembre) que en el resto, quizás debido a la mayor altitud de esta zona.

3.1.3.1. Consecuencias morfogenéticas

Las características climatológicas de una región van a jugar un papel preponderante, lógicamente, en los procesos morfológicos que se van a desarrollar en ella.

WILSON (1968) establece un diagrama en el que diferencia una serie de regímenes climáticos y sistemas de procesos morfoclimáticos, atendiendo a la variación mensual de precipitación con la temperatura mensual media.

Si proyectamos en este diagrama los climatogramas correspondientes a nuestra zona, podremos establecer dentro de qué régimen climático va a caer cada uno de los puntos del climatograma, con las correspondientes implicaciones morfogenéticas.

Hemos de señalar que únicamente hemos representado en el diagrama de Wilson uno de los tres climatogramas estudiados en el subapartado anterior, el correspondiente a Cabezas de Alambre, debido a la similitud existente entre todos ellos y con el fin de que la figura quedara más clara.

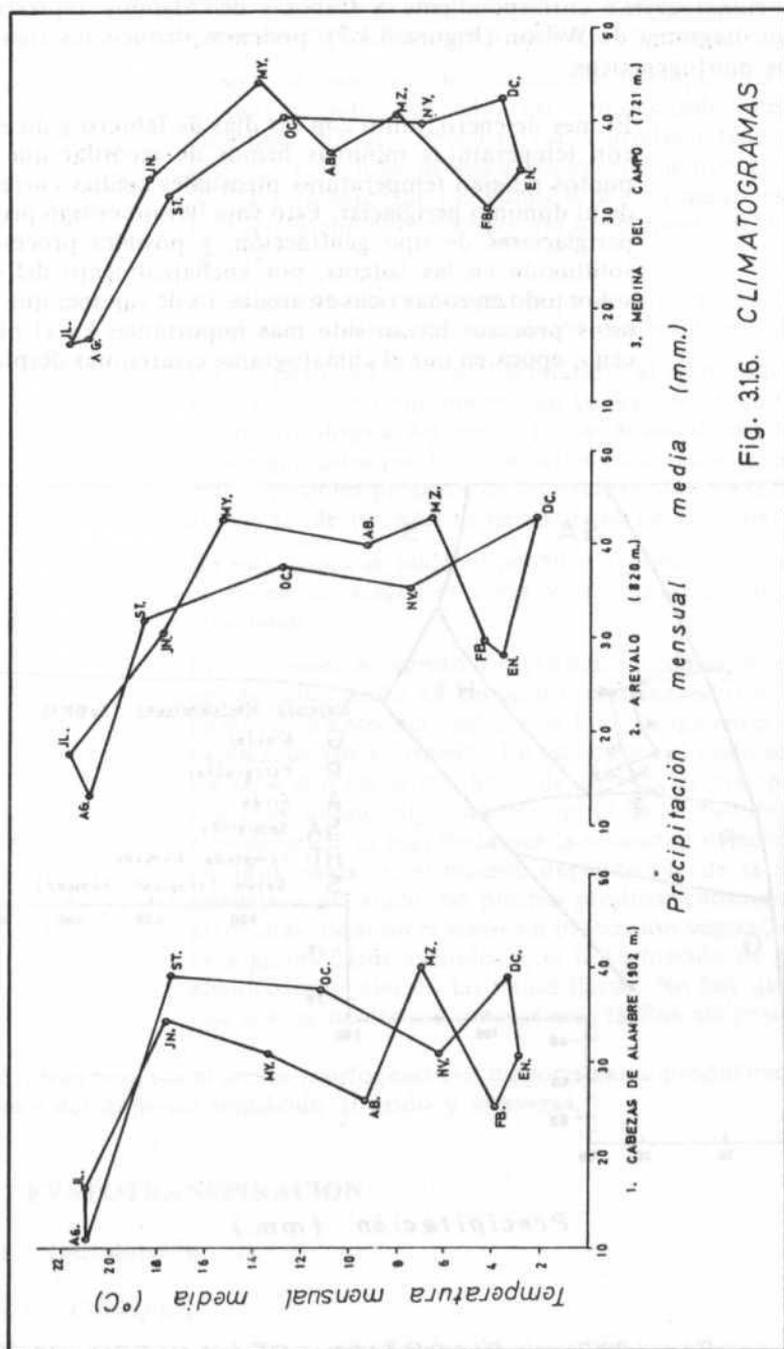


Fig. 3.16. CLIMATOGRAMAS

Del climatograma correspondiente a Cabezas de Alambre representado sobre un diagrama de Wilson (Figura 3.1.7), podemos deducir los siguientes procesos morfogenéticos:

- El mes de enero, junto con los días de febrero y diciembre con temperaturas mínimas hemos de recordar que estos puntos reflejan temperaturas mensuales medias correspondiente al dominio periglaciario. Esto va a llevar consigo procesos periglaciares de tipo gelifracción, y posibles procesos de soliflucción en las laderas, por encharcamiento del suelo, sobre todo en zonas ricas en arcilla. Es de suponer que todos estos procesos hayan sido más importantes en el pleistoceno, época en que el climatograma estaría más desplazado

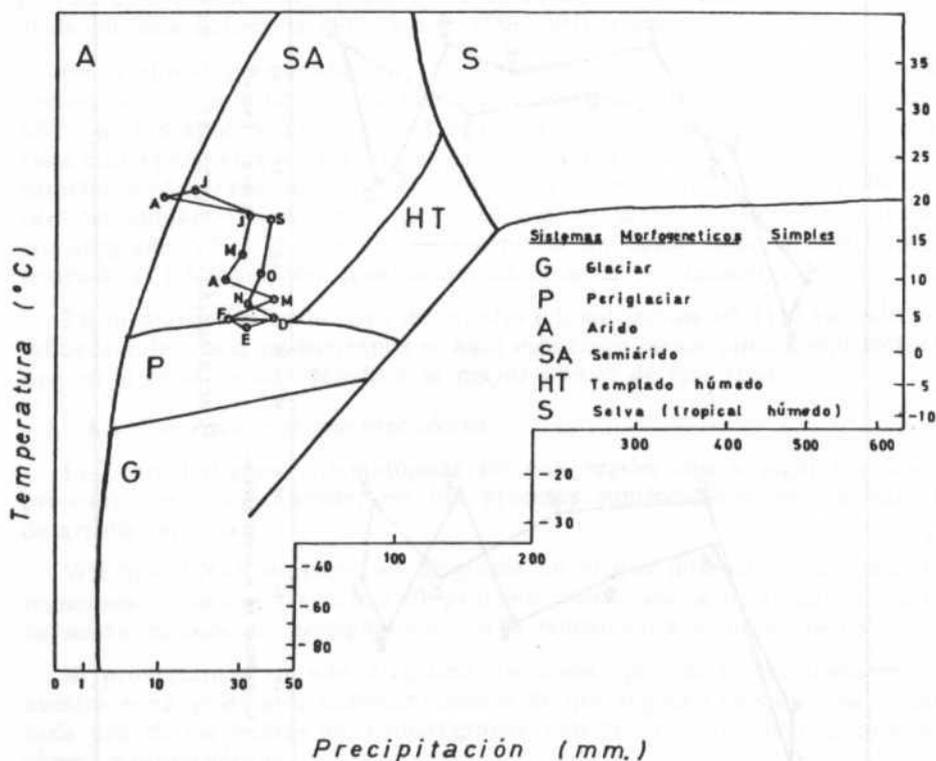


Fig. 3.1.7. DIAGRAMA DE WILSON (1968)

hacia abajo en el diagrama, lo que implicaría una mayor duración de los mismos a lo largo del año.

- El sistema morfogénico semiárido es el que va a dominar la mayor parte del año, tal como puede verse en el diagrama. En esta época se van a producir fenómenos de acarreo, e incluso procesos de encajamientos de arroyos, con la formación de bad-lands si la roca madre es blanda. Este fenómeno puede observarse actualmente en la cabecera del río.

Al comienzo de la primavera, si las lluvias son intensas, pueden producirse fenómenos de ramblamiento del río.

- En el paso del dominio semiárido al dominio árido se produce un marchitamiento de la vegetación con la desecación fisiológica del suelo. En las zonas donde las aguas contengan sales pueden producirse fenómenos de precipitación y posibles procesos de recristalización. Es la época del comienzo de posibles cementaciones de carbonatos.

En esta época se podrían producir fenómenos eólicos pero la época de aridez es corta y la vegetación impide esta movilidad.

- En los meses de agosto a septiembre pasamos nuevamente del dominio árido al semiárido, comenzando de nuevo el humedecimiento del suelo, con los consiguientes procesos explicados anteriormente. En esta época el suelo se encuentra seco con los poros llenos de aire. Si las precipitaciones son muy abundantes sucede que la velocidad de infiltración del suelo es más lenta que la velocidad de acumulación de agua caída en el mismo, dependiendo de la textura y estructura del suelo. Se pueden producir entonces grandes arroyadas, estando el suelo sin protección vegetal, e incluso en algunos casos avenidas, con la formación de pequeños abanicos aluviales en las zonas llanas. No hay que olvidar que la roca madre son arcosas muy fácilmente erosionables.

En resumen, los procesos morfogénicos mayores van a producirse durante el paso del dominio semiárido al árido y viceversa.

3.2. EVAPOTRANSPIRACION

3.2.1. Introducción

3.2.1.1. Conceptos

Una gran parte de la agua que llega a la tierra vuelve nuevamente a la

atmósfera en forma de vapor, directamente por evaporación —a partir de una lámina de agua libre o de un suelo sin vegetación— o a través de las plantas por transpiración.

En condiciones naturales, es preciso reunir ambos términos, evaporación y transpiración, pues, en terrenos con vegetación, los dos procesos se efectúan simultáneamente y son interdependientes. El término evapotranspiración (*ET*), por tanto, se utiliza para expresar la unión de estos dos procesos.

La evapotranspiración depende, entre otros, de dos factores muy variables y difíciles de medir: el grado de humedad del suelo y el desarrollo vegetal de la planta. Ante esta dificultad para conocer estos dos factores, THORNTHWAITTE (en CUSTODIO y LLAMAS, 1976, p. 323) introduce un nuevo concepto optimizando ambos. Define la *evapotranspiración potencial (ETP)* como la cantidad de agua que perdería un suelo, por evapotranspiración, en el doble supuesto de un desarrollo vegetal óptimo y una capacidad de campo permanentemente completa. Este concepto marcará el límite superior de la cantidad de agua que realmente vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración, en unas condiciones cualesquiera, y que se conoce con el nombre de *evapotranspiración real (ETR)*.

Solamente en condiciones óptimas la *ETR* coincidirá con la *ETP*. En los demás casos, la *ETR* va a ser menor que la *ETP*.

3.2.1.2. Métodos de cálculo

Existen diversidad de métodos para calcular la evapotranspiración: métodos teóricos (balance de energía, etc.). Medidas directas (evapotranspirómetros, lisímetros, etc.), y métodos empíricos (fórmula de Thornthwaite, etc.).

Al ser la evapotranspiración un fenómeno microclimático, lógicamente, los métodos más válidos van a ser los que más consideren esta cuestión. Nos encontramos con el inconveniente de que estos métodos van a resultar excesivamente costosos, o de no encontrar en una estación climatológica todos los datos necesarios para su aplicación.

La necesidad de tener, al menos, órdenes de magnitud nos hace aceptar los valores deducidos de fórmulas empíricas que se apoyan en datos climatológicos corrientemente asequibles, como son la precipitación y la temperatura.

3.2.2. Cálculo de la ETP. Fórmula de Thornthwaite

Thornthwaite encontró que la *ETP* depende fundamentalmente de la temperatura media mensual. Esto hace posible que al ser las observaciones de temperaturas relativamente abundantes, también puedan serlo los datos de *ETP*.

A partir de estos valores de temperaturas medias mensuales calcula un índice de calor mensual, mediante la fórmula:

$$i = (t/5)^{1.514}$$

hallando, a continuación, el índice de calor anual $I = \Sigma i$.

A continuación, calcula la *ETP* sin ajustar, considerando meses teóricos de 30 días, con 12 horas diarias de sol. Finalmente, teniendo en cuenta la duración real del mes y el número máximo de horas de sol, según la latitud del lugar, obtenemos los valores ajustados de la *ETP*.

De este modo hemos calculado la *ETP* según el método de Thornthwaite (Tabla 3.2.1.) para tres puntos de la cuenca, repartidos geográficamente en la misma, de los cuales disponíamos de temperaturas medias mensuales.

3.2.3. Estimación de la ETR a partir de valores de ETP

La *ETP* representa la cantidad máxima de agua que vuelve a la atmósfera. Para poder determinar la *ETR* es necesario tener también en cuenta el agua que existe realmente en la zona.

Un balance hídrico se puede plantear del siguiente modo:

$$P = ETR + EX + \Delta R$$

siendo:

P = Precipitación en mm.

ETR = Evapotranspiración real en mm.

EX = Excedentes de agua (escorrentía infiltración), en mm.

ΔR = Incremento en la reserva de agua utilizable por las plantas en mm., y con la condición $ETR \leq ETP$.

De la expresión anterior podemos deducir la *ETR* a partir de la *ETP*, siempre que conozcamos los valores de la precipitación y de la reserva de agua utilizable.

Hemos obtenido los valores de la *ETR*, según el método de Thornthwaite, para los tres puntos expresados en la Tabla 3.2.1., habiéndose estimado la reserva de agua utilizable por las plantas, en esta zona, de 50 mm.

Si en un mes determinado, la P es superior a la *ETP* entonces la *ETR* será igual a la *ETP*, constituyendo el excedente de P la reserva de agua utilizable, que se irá acumulando mes a mes, hasta alcanzar el valor máximo de 50 mm., que es el límite asignado para esta zona.

En el momento en que la P comienza a ser menor que la *ETP*, entonces la *ETR* será igual a la P más la cantidad de agua que vaya tomando de la reserva, hasta que alcance el valor de la *ETP*. En el momento en que la reserva se agote, entonces la P será igual a la *ETR*, constituyendo el déficit de agua necesaria para que la *ETR* alcance el valor de la *ETP*.

Los balances hídricos mensuales, calculados según este método, para las tres

TABLA 3.2.1.
CALCULO DE LA ETP. METODO DE THORNTHWAITE

	CABEZAS DE ALAMBRE												
	En.	Fb.	Mz.	Ab.	My.	Jn.	Jl.	Ag.	St.	Oc.	Nv.	Dc.	
Ta. media mensual	3,0	4,0	7,1	9,4	13,4	17,7	21,1	21,0	17,5	11,3	6,3	3,5	Ta. media anual = 11,3 °C
i	0,46	0,71	1,70	2,60	4,45	6,78	8,85	8,78	6,66	3,44	1,42	0,58	I = 46,43
ETP sin ajustar	9,30	13,29	27,12	38,44	59,73	84,42	105,02	104,41	83,24	48,33	23,38	11,26	
ETP ajustada ..	7,77	10,96	28,03	42,61	74,07	105,52	132,94	123,17	86,70	46,61	19,48	9,11	ETP anual = 687,0 mm.

AREVALO

	MEDINA DEL CAMPO												
	En.	Fb.	Mz.	Ab.	My.	Jn.	Jl.	Ag.	St.	Oc.	Nv.	Dc.	
Ta. media mensual	3,6	4,4	6,6	9,3	15,3	17,8	21,7	20,9	18,6	12,8	7,5	2,2	Ta. media anual = 11,7 °C
i	0,61	0,82	1,52	2,56	5,44	6,84	9,23	8,72	7,31	4,15	1,85	0,29	I = 49,33
ETP sin ajustar	10,66	13,81	23,29	36,24	68,85	83,68	108,04	102,93	88,56	54,70	27,46	5,65	
ETP ajustada ..	8,90	11,38	24,06	40,16	85,37	104,61	136,75	121,43	92,26	52,76	22,88	5,57	ETP anual = 705,2 mm.

MEDINA DEL CAMPO

	MEDINA DEL CAMPO												
	En.	Fb.	Mz.	Ab.	My.	Jn.	Jl.	Ag.	St.	Oc.	Nv.	Dc.	
Ta. media mensual	2,9	4,3	8,1	10,9	13,8	18,4	21,7	20,9	17,6	12,8	7,0	3,7	Ta. media anual = 11,8 °C
i	0,44	0,80	2,08	3,25	4,65	7,19	9,23	8,72	6,72	4,15	1,66	0,63	I = 49,52
ETP sin ajustar	8,01	13,33	30,22	44,35	60,16	87,25	107,99	102,87	82,38	54,59	25,02	10,98	
ETP ajustada ..	6,69	10,99	31,23	49,16	74,60	109,07	136,69	121,36	85,82	52,65	20,85	8,89	ETP anual = 708,0 mm.

estaciones mencionadas anteriormente, se expresan en la Tabla 3.2.2. Igualmente en la Figura 3.2.1. se puede ver la representación gráfica de este balance hídrico mensual correspondiente a una de estas tres estaciones.

3.2.4. Cálculo de la ETR. Fórmulas de Turc y de Coutagne

Ambas fórmulas, la de Turc y la de Coutagne, sirven para calcular, de modo aproximado, los valores de la ETR, en función de la precipitación y de la temperatura.

Turc expresa la siguiente ecuación:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

en la que:

ETR = Evapotranspiración real en mm/año.

P = Precipitación en mm/año.

L = $300 + 25 T + 0,05 T^3$.

T = Temperatura media anual en °C.

La fórmula de Coutagne para calcular la ETR es la siguiente:

$$ETR = P - k P^2$$

siendo:

ETR = Evapotranspiración real en m/año.

P = Precipitación en m/año.

k = $1 / 0,8 + 0,4 T$.

T = Temperatura media anual en °C.

Esta fórmula es válida para valores de *P* (en m.), comprendidos entre $1 / 8k$ y $1 / 2k$, condición que se cumple en nuestra zona.

Aplicando estas dos ecuaciones descritas anteriormente, hemos hecho el cálculo de la ETR para 19 estaciones de la zona de estudio, únicas para las cuales disponíamos de datos de temperaturas medias anuales (Tabla 3.2.3.).

Si comparamos estos valores de ETR así calculados con sus respectivos valores calculados por el método de Thornthwaite, expresados en la Tabla 3.2.2., vemos que el valor de ETR según Turc es mayor, y este mismo valor según Coutagne es menor. Por tanto, con el fin de aproximarnos más a los valores de ETR calculados por el método de Thornthwaite, que consideramos el más perfecto por tener en cuenta mayor cantidad de variables, hemos

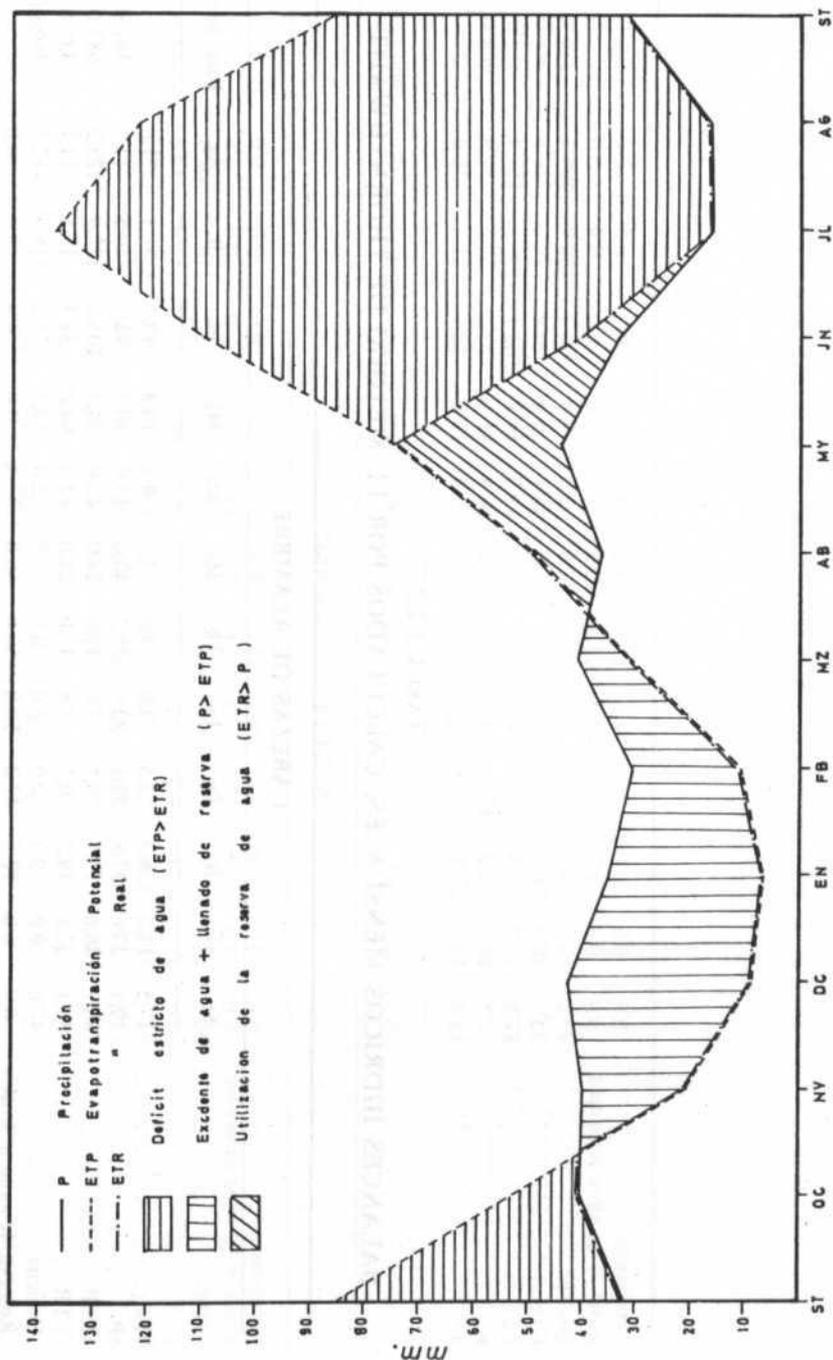


Fig. 3.2.1. REPRESENTACION GRAFICA DEL BALANCE HIDRICO MENSUAL PARA LA ESTACION DE MEDINA DEL CAMPO

TABLA 3.2.2.
BALANCES HIDRICOS MENSUALES, CALCULADOS POR EL METODO DE THORNTHWAITTE

	CABEZAS DE ALAMBRE												Total (mm.)
	St.	Oc.	Nv.	Dc.	En.	Fb.	Mz.	Ab.	My.	Jn.	Jl.	Ag.	
Ta.....	17,5	11,3	6,3	3,5	3,0	4,0	7,1	9,4	13,4	17,7	21,1	21,0	361,9
P.....	39,1	37,6	31,8	39,1	30,6	25,2	40,0	25,9	30,7	34,3	16,5	11,1	687,0
ETP.....	86,7	46,6	19,5	9,1	7,8	11,0	28,0	42,6	74,1	105,5	132,9	123,2	320,6
ETR.....	39,1	37,6	19,5	9,1	7,8	11,0	28,0	42,6	64,0	34,3	16,5	11,1	366,4
Déficits.....	47,6	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,1	71,2	116,4	112,1	
Reserva de agua utilizable	0,0	0,0	12,3	42,3	50,0	50,0	50,0	33,3	0,0	0,0	0,0	0,0	41,3
Excedentes.....	0,0	0,0	0,0	0,0	15,1	14,2	12,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

AREVALO

	MEDINA DEL CAMPO												Total (mm.)
	St.	Oc.	Nv.	Dc.	En.	Fb.	Mz.	Ab.	My.	Jn.	Jl.	Ag.	
Ta.....	18,6	12,8	7,5	2,2	3,6	4,4	6,6	9,3	15,3	17,8	21,7	20,9	392,0
P.....	31,9	37,5	35,3	42,9	28,2	29,7	42,7	39,7	42,6	30,6	17,6	13,3	705,2
ETP.....	92,3	52,8	22,9	4,5	8,9	11,4	24,1	40,2	85,4	104,6	136,7	121,4	335,0
ETR.....	31,9	37,5	22,9	4,5	8,9	11,4	24,1	40,2	85,4	37,3	17,6	13,3	370,2
Déficits.....	60,4	15,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	67,3	119,1	108,1	
Reserva de agua utilizable	0,0	0,0	12,4	50,0	50,0	50,0	50,0	49,5	6,7	0,0	0,0	0,0	57,3
Excedentes.....	0,0	0,0	0,0	0,8	19,3	18,3	18,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

MEDINA DEL CAMPO

	MEDINA DEL CAMPO												Total (mm.)
	St.	Oc.	Nv.	Dc.	En.	Fb.	Mz.	Ab.	My.	Jn.	Jl.	Ag.	
Ta.....	17,6	12,8	7,0	3,7	2,9	4,3	8,1	10,9	13,8	18,4	21,7	20,9	408,6
P.....	32,1	40,5	39,8	42,4	34,8	30,9	40,7	36,6	44,1	33,7	16,1	16,9	708,0
ETP.....	85,8	52,6	20,8	8,9	6,7	11,0	31,2	49,2	74,6	109,1	136,7	121,4	348,6
ETR.....	32,1	40,5	20,8	8,9	6,7	11,0	31,2	49,2	74,6	40,6	16,1	16,9	359,4
Déficits.....	53,7	12,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	68,5	120,6	104,5	
Reserva de agua utilizable	0,0	0,0	19,0	50,0	50,0	50,0	50,0	37,4	6,9	0,0	0,0	0,0	60,0
Excedentes.....	0,0	0,0	0,0	2,5	28,1	19,9	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

establecido la media aritmética de la *ETR*, según Turc y según Coutagne, como valor más idóneo (1).

En la Figura 3.2.2. se representan las diversas zonas de iso-evapotranspiración. Podemos observar que todos los valores son muy semejantes, y próximos a 350 mm.

De modo general podemos deducir que las pérdidas por evapotranspiración suponen, a lo largo del año, de un 80 a 90 % de las precipitaciones. SOLER (1976) señala valores comprendidos entre un 75 a 95 % de las precipitaciones, en su zona de trabajo.

3.2.5. Elaboración de los datos obtenidos: cálculo de la *ETR* media anual

A fin de calcular la *ETR* media anual de la zona hemos utilizado el método de los polígonos de Thiessen (Figura 3.2.3.), ya descrito en 3.1.1.6.3., por considerarle el método más adecuado al tratarse de valores de *ETR* bastante homogéneos y de una zona llana.

Hemos utilizado los valores de *ETR* media anual expresados en la Tabla 3.2.3.

En la Tabla 3.2.4. expresamos estos valores de *ETR* junto con la superficie asignada a cada polígono, haciendo el cálculo por separado para ambas cuencas, estableciendo finalmente la *ETR* media anual del total de la zona.

Podemos ver que la *ETR* media anual es, aproximadamente de 350 mm., equivalentes a un volumen de agua de 500 a 600 Hm³, lo que supone en términos generales un 80-90 % de las precipitaciones.

3.3. LLUVIA EFICAZ

3.3.1. Introducción

La fracción de las precipitaciones que no se evapotranspira, y que va a producir escorrentía, bien superficial o subterránea, constituye lo que se denomina «lluvia eficaz» o «lluvia útil».

En una unidad hidrogeológica cerrada, este volumen de lluvia útil o eficaz, para un año hidrológico medio, va a constituir el agua disponible en la cuenca para ese mismo período.

(1) Siempre que hablemos del valor de la *ETR* media anual nos referiremos a la media aritmética de la *ETR* media anual, según Turc y según Coutagne, denominándola *ETR*, o simplemente *ET*.

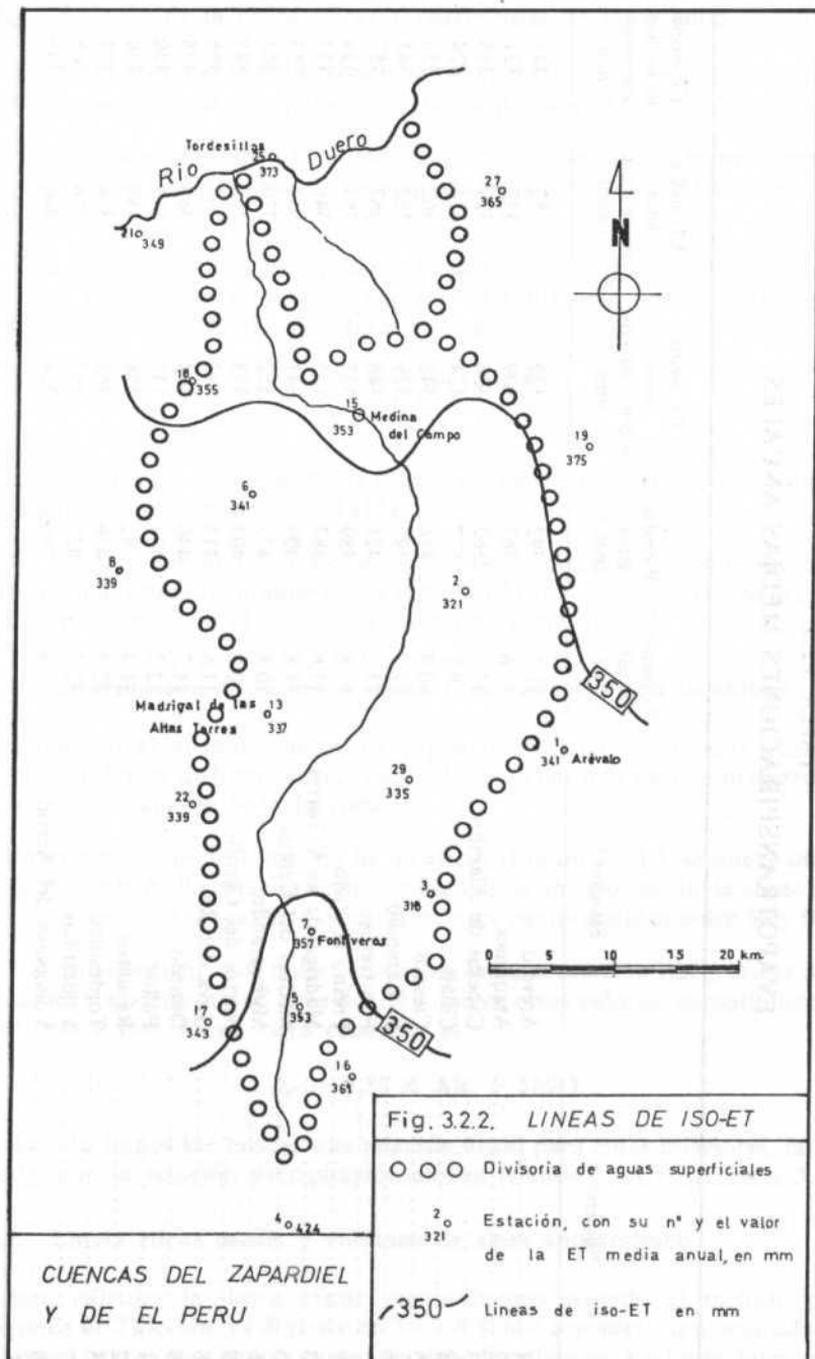


TABLA 3.2.3.

EVAPOTRANSPIRACIONES MEDIAS ANUALES

Número	Estación	T _a media anual (°C)	P media anual (mm.)	ET media anual según Couagne (mm.)	ET media anual según Turc (mm.)	ET media de las dos anteriores (mm.)
1	Arévalo	11,7	392	329	352	341
2	Ataques	11,6	363	309	329	321
3	Cabezas de Alambre	11,3	362	306	329	318
4	Cillán	9,8	577	424	424	424
5	Crespos	10,9	418	343	362	353
6	El Campillo	11,7	392	329	352	341
7	Fontiveros	11,2	421	346	367	357
8	Fresno el Viejo	11,8	389	327	351	339
13	Madrigal de las A. Torres	11,6	387	325	348	337
15	Medina del Campo	11,8	409	341	364	353
16	Muñozgrande	10,8	433	352	370	361
17	Narros del Castillo	10,8	403	333	353	343
18	Nava del Rey	11,8	413	343	366	355
19	Olmedo	11,7	446	364	385	375
21	Pollos	12,2	401	337	361	349
22	Rasueros	11,4	392	328	350	339
25	Tordesillas	12,3	436	361	384	373
27	Valdestillas	12,0	427	353	376	365
29	Villanueva del Aceral	11,4	386	324	346	335

3.3.2. Cálculo de la lluvia eficaz y coeficientes de escorrentía

La lluvia eficaz se calcula, según la definición dada anteriormente, hayando la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración.

Este cálculo lo hemos efectuado a partir de los datos de precipitación y evapotranspiración expuestos en los apartados anteriores, dentro de este mismo capítulo.

Esta fracción de las precipitaciones que no se evapotranspira y que va a producir escorrentía se puede expresar en tanto por uno, constituyendo el coeficiente de escorrentía, que será igual a:

$$C.E. = \frac{P - ET}{P}$$

Los valores de la lluvia eficaz junto con los coeficientes de escorrentía, así calculados, se expresan en la Tabla 3.3.1.

Se puede observar que los coeficientes de escorrentía son muy similares en toda la zona, estando comprendidos entre 0,12 y 0,17, a excepción de la estación de Cillán, situada en el Sur de la zona que tiene un *C.E.* más alto.

3.3.3. Distribución de la lluvia eficaz y su variación con la altitud

Siguiendo el mismo sistema ya expuesto en 3.1.1.6.2. hemos trazado un mapa de isolíneas de lluvia eficaz, con el fin de tener una idea de la distribución de la lluvia eficaz en toda la zona.

En este mapa de isolíneas de lluvia eficaz (Figura 3.3.1.), se puede observar que la mayoría de las estaciones de la zona tienen un valor de lluvia eficaz menor a 60 mm., estando la mayoría de estos valores comprendidos entre 50 y 60 mm.

Podemos deducir, por tanto, que no existe una relación lluvia eficaz-altitud, debido a esta uniformidad en la distribución de estos valores, exceptuando cotas superiores a los 775 m. cuya ecuación es:

$$P_{ef} = 0,25 \times \text{Alt.} - 162,3$$

Ha sido imposible buscar una relación lineal para cotas inferiores, tal como sucedía con la relación precipitación-altitud (punto 3.1.1.5.) (Figura 3.3.2.).

3.3.4. Lluvia eficaz media y volumen de agua aprovechable

Para calcular la lluvia eficaz media hemos seguido el método de los polígonos de Thiessen, ya descrito en 3.1.1.6.3. por considerarle el más adecuado al tratarse, tal como hemos visto, de una distribución bastante homogénea.

TABLA 3.2.4.
CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION MEDIA ANUAL POR EL METODO DE
LOS POLIGONOS DE THIESSEN

Número	Estación	Cuenca del Zapardiel			Cuenca de El Perú		
		ET media anual (mm.)	Superficie asignada (Km ²)	Volumen (Hm ³)	ET media anual (mm.)	Superficie asignada (Km ²)	Volumen (Hm ³)
1	Arévalo	341	42,4	14,5			
2	Ataquines	321	231,2	74,2			
3	Cabezas de Alambre	318	53,6	17,0			
4	Cillán	424	0,8	0,4			
5	Crespos	353	56,4	19,9			
6	El Campillo	341	171,2	58,4			
7	Fontiveros	357	122,8	43,8			
<hr/>							
8	Fresno el Viejo	339	24,8	8,4			
13	Madrigal de las A. Torres	337	154,8	52,2			
15	Medina del Campo	353	186,4	65,8	353	54,8	19,3
16	Muñogrande	361	9,2	3,3			
17	Narros del Castillo	343	29,2	10,0			
18	Nava del Rey	355	75,2	26,7			
19	Olmedo	375	32,4	12,2			
21	Pollos	349	9,6	3,4			
22	Rasueros	339	60,0	20,3			
25	Tordesillas	373	20,8	7,8	373	90,8	33,9
27	Valdestillas				365	60,4	22,0
29	Villanueva del Aceral	335	158,4	53,1			
Total			1.439,2	491,4		206,0	75,2
<hr/>							
ET media anual Cuenca del Zapardiel.....		341,4 mm. = 491,4 Hm ³ .					
ET media anual Cuenca de El Perú.....		365,1 mm. = 75,2 Hm ³ .					
ET media anual de toda la zona.....		344,4 mm. = 566,6 Hm ³ .					

TABLA 3.3.1.

CALCULO DE LA LLUVIA EFICAZ Y DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTIA

Número	Estación	Altitud (m)	P (mm)	ET (mm)	P Eficaz (mm)	C.E.
1	Arévalo	820	392	341	51	0,13
2	Ataquines	802	363	321	42	0,12
3	Cabezas de Alambre	902	362	318	44	0,12
4	Cillán	1.212	577	424	153	0,27
5	Crespos	924	418	353	65	0,16
6	El Campillo	748	392	341	51	0,13
7	Fontiveros	885	421	357	64	0,15
8	Fresno el Viejo	761	389	339	50	0,13
13	Madrial de las A. Torres	808	387	337	50	0,13
15	Medina del Campo	721	409	353	56	0,14
16	Muñogrande	944	433	361	72	0,17
17	Narros del Castillo	955	403	343	60	0,15
18	Nava del Rey	748	413	355	58	0,14
19	Olmedo	771	446	375	71	0,16
21	Pollos	684	401	349	52	0,13
22	Rasueros	834	392	339	53	0,14
25	Tordesillas	670	436	373	63	0,14
27	Valdestillas	699	427	365	62	0,15
29	Villanueva del Aceral	846	386	335	51	0,13

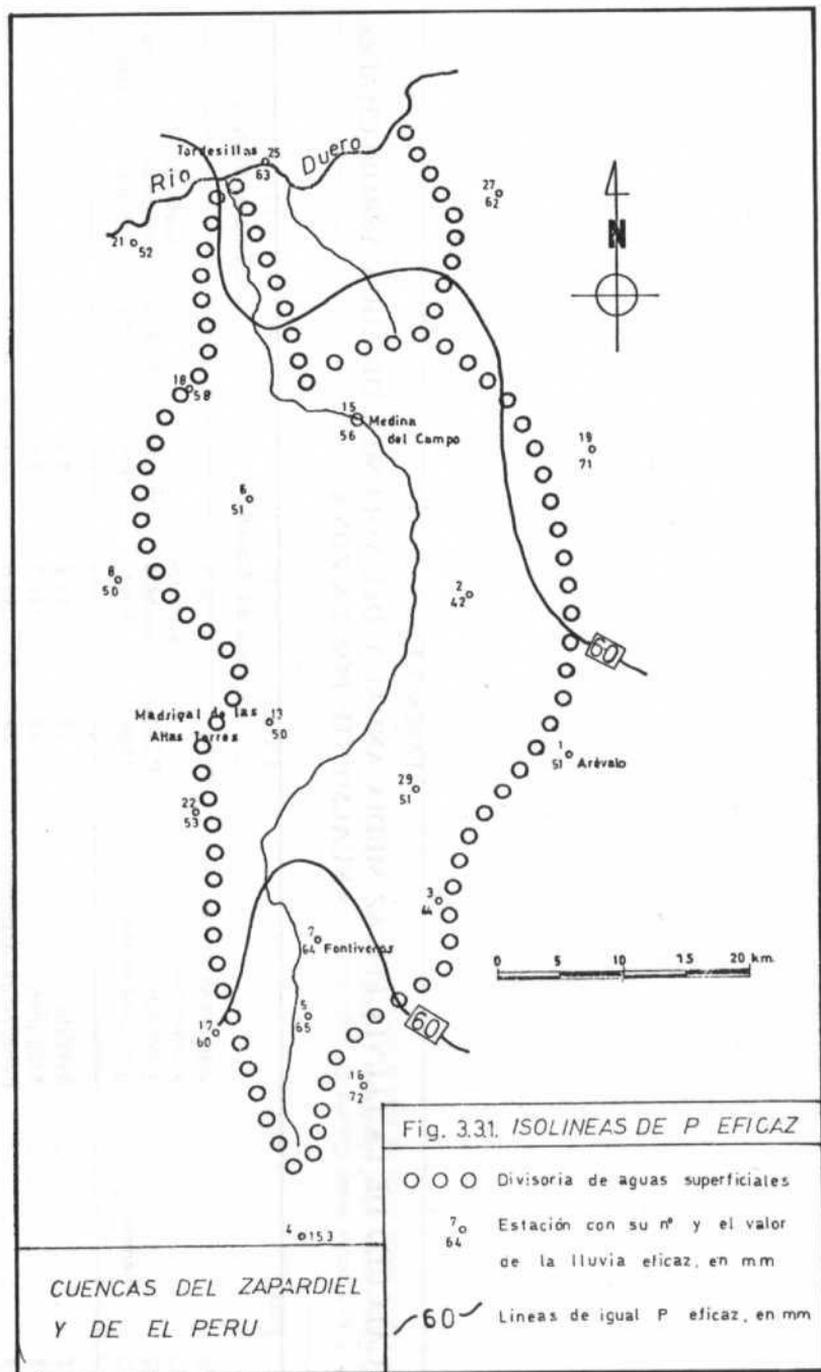


Fig. 3.31. ISOLINEAS DE P EFICAZ

- ○ ○ Divisoria de aguas superficiales
- 70
64 Estación con su nº y el valor de la lluvia eficaz, en mm
- 60 ——— Líneas de igual P eficaz, en mm

CUENCAS DEL ZAPARDIEL
Y DE EL PERU

TABLA 3.3.2.

CALCULO DE LA LLUVIA EFICAZ MEDIA ANUAL Y DEL VOLUMEN DE AGUA APROVECHADO ANUALMENTE POR LA ZONA

Número	Estación	Cuenca del Zapardiel			Cuenca de El Perú		
		P Eficaz (mm.)	Superficie asignada (Km ²)	Volumen (Hm ³)	P Eficaz (mm.)	Superficie asignada (Km ²)	Volumen (Hm ³)
1	Arévalo	51	42,4	2,1			
2	Ataquines	42	231,2	9,6			
3	Cabezas de Alambre	44	53,6	2,3			
4	Cillán	153	0,8	0,1			
5	Crespos	65	56,4	3,6			
6	El Campillo	51	171,2	8,6			
7	Fontveros	64	122,8	7,7			
Total		1.439,2	74,7	206,0	12,6		
8	Fresno el Viejo	50	24,8	1,2			
13	Madrigal de las A. Torres	50	154,8	7,6			
15	Medina del Campo	56	186,4	10,3	56	54,8	3,1
16	Muñogrande	72	9,2	0,6			
17	Narros del Castillo	60	29,2	1,7			
18	Nava del Rey	58	75,2	4,3			
19	Olmedo	71	32,4	2,3			
21	Pollos	52	9,6	0,4			
22	Rasueros	53	60,0	3,1			
25	Tordestillas	63	20,8	1,2	63	90,8	57,0
27	Valdestillas				62	60,4	3,8
29	Villanueva del Aceral	51	158,4	8,0			
Total		1.439,2	74,7	206,0	12,6		
P Eficaz media anual Cuenca del Zapardiel							51,9 mm. = 74,7 Hm ³
P Eficaz media anual Cuenca de El Perú							61,1 mm. = 12,6 Hm ³
P Eficaz media anual de toda la zona							53,1 mm. = 87,3 Hm ³

Los valores de las superficies asignadas a cada polígono son los ya descritos en el subapartado 3.2.5., habiéndose realizado asimismo el cálculo por separado: para ambas cuencas y para el conjunto de la zona.

En la Tabla 3.3.2. se expresan estos valores de lluvia eficaz media y el volumen de agua aprovechado anualmente por la zona.

Finalmente, en la Tabla 3.3.3., expresamos un cuadro resumen de la lluvia eficaz media y del volumen de agua aprovechable por cada una de las cuencas y para el total de la zona.

La lluvia eficaz media anual en la zona, vemos que oscila entre 50-60 mm., correspondientes a un volumen de agua aprovechable de 80 a 100 Hm³, aproximadamente.

3.4. HIDROLOGIA SUPERFICIAL

3.4.1. Introducción

Se denomina *escorrentía*, o aportación de un río en una determinada sección de su cauce, al volumen de agua que pasa por ese punto en un determinado período de tiempo.

Como ya hemos indicado en el apartado anterior, la fracción de las precipitaciones que no se evapotranspira va a producir *escorrentía*, bien superficial o subterránea.

La *escorrentía directa* es la parte de la *escorrentía total* que pasa por un determinado punto poco tiempo después de producirse la precipitación que la ha originado. Incluye la precipitación sobre el cauce, la *escorrentía superficial* y la *escorrentía hipodérmica*.

La *escorrentía hipodérmica* es *escorrentía subterránea* muy cercana a la superficie que se convierte en superficial antes de llegar al cauce.

La *escorrentía básica* es la que está alimentando el cauce constantemente, aún cuando no existan precipitaciones. Incluye la *escorrentía subterránea* y la *escorrentía superficial diferida*.

La *escorrentía superficial diferida* es la que llega a la estación de aforos con un retraso considerable respecto a la precipitación que la originó, debido a que fue retenida durante algún tiempo en algún lago, embalse o zona pantanosa.

Normalmente se confunden ambos conceptos: el de *escorrentía directa* con *escorrentía superficial*, y el de *escorrentía básica* con *escorrentía subterránea*.

El escaso relieve y pobre vegetación existentes en la Cuenca del Zapardiel va a originar, entre otros factores, una *escorrentía* muy limitada.

La medida de los caudales que lleva un río se realiza en las estaciones de aforo, que proporcionan valores de caudales diarios, excepto en ocasiones en

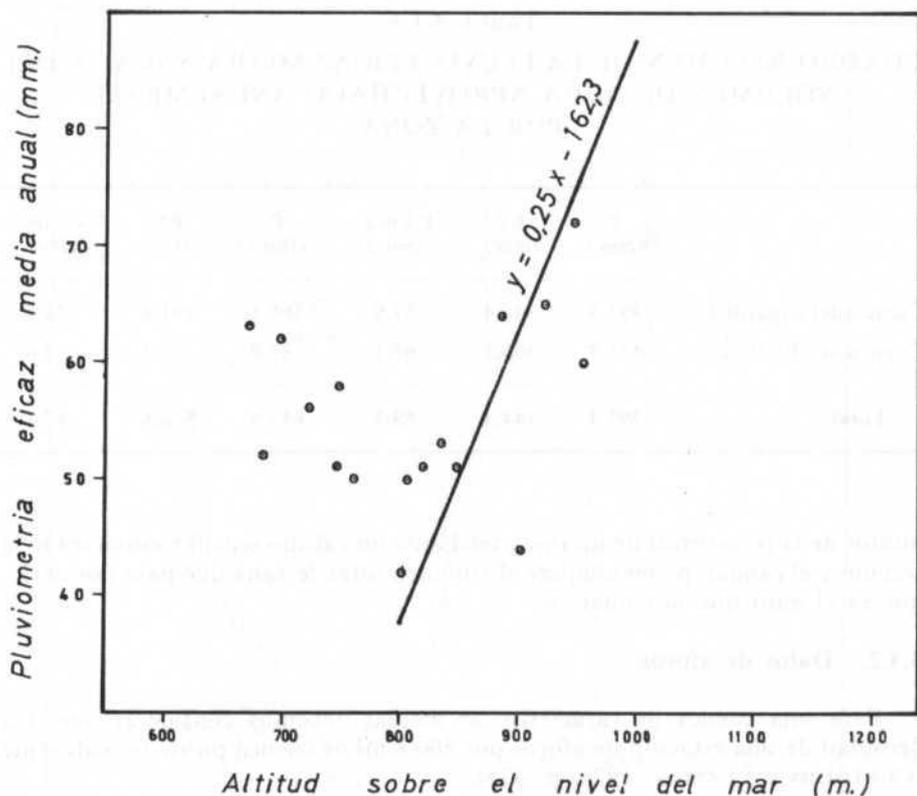


Fig. 33.2. VARIACION DE LA LLUVIA EFICAZ CON LA ALTITUD

que se dispone de un registro gráfico continuo (limnigramas).

En la Cuenca del Zapardiel no se dispone de ningún dato de aforos, al no existir ninguna estación de aforos en la misma.

Obviamente, lo ideal sería disponer de datos de aforos para un período largo de observación, para tener una idea del caudal medio y del caudal extremo, con el fin de que tuviéramos reflejadas sequías prolongadas, períodos de aportaciones altas, etc.

Al no disponer de datos de aforos, como ya hemos indicado anteriormente, se han realizado dos campañas de aforo, con el interés de conocer directamente el caudal del río en el momento de hacer la medida.

Hemos de señalar que los aforos se realizaron con molinete. Consiste el método en determinar, mediante un molinete, la velocidad del agua en distintos

TABLA 3.3.3.

CUADRO RESUMEN DE LA LLUVIA EFICAZ MEDIA ANUAL Y DEL VOLUMEN DE AGUA APROVECHADO ANUALMENTE POR LA ZONA

	P (mm.)	ET (mm.)	P Eficaz (mm.)	P (Hm ³)	ET (Hm ³)	Volumen (Hm ³)
Cuenca del Zapardiel .	393,3	341,4	51,9	566,1	491,4	74,7
Cuenca de El Perú .	426,2	365,1	61,1	87,8	75,2	12,6
Total	397,4	344,4	53,1	653,9	566,6	87,3

puntos de la transversal de un río, y mediante un cálculo sencillo, conociendo la sección y el caudal, poder conocer el volumen total de agua que pasa por el río, que es el dato que nos interesa.

3.4.2. Datos de aforos

Para una cuenca de características medias debemos considerar que una densidad de una estación de aforos por 500 Km² de cuenca puede ser suficiente (CUSTODIO y LLAMAS, 1976, p. 375).

En la Cuenca del Zapardiel se han elegido cinco puntos con el fin de realizar las dos campañas de aforos, ya mencionadas anteriormente (Figura 3.4.1.).

La primera campaña de aforos se realizó el día 3-6-78 antes del comienzo de la campaña de riegos, coincidiendo con la situación del nivel piezométrico regional más alto. La segunda campaña se realizó el día 2-10-78, al finalizar la temporada de riegos, época en la que suponemos se encuentra más bajo el nivel piezométrico regional.

En la Tabla 3.4.1. se pueden ver los valores registrados durante las dos campañas de aforos realizadas en los cinco puntos señalados anteriormente. Se observan los caudales en m³/s., y los caudales específicos en l/s × Km² de cuenca, junto con las longitudes parciales y totales del río, y las superficies de cuenca totales y parciales correspondientes a cada uno de los puntos del cauce del río donde se realizaron los aforos.

Los aforos realizados durante la primera campaña nos muestran un progresivo aumento del caudal a lo largo del curso del río (Figura 3.4.2.). Del mismo modo se puede observar que a partir de Torrecilla del Valle (estación nº 4) este aumento del caudal es algo menor, situación normal, ya que en este punto recoge menos superficie de cuenca.

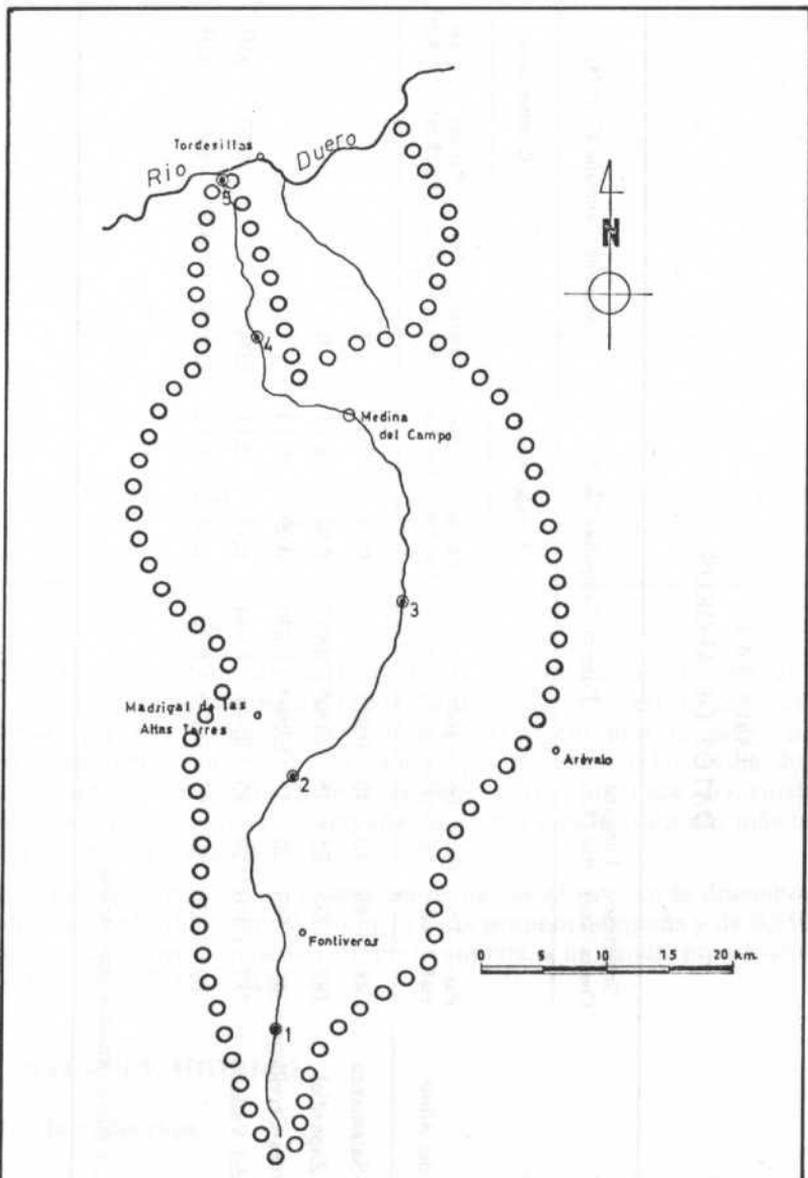
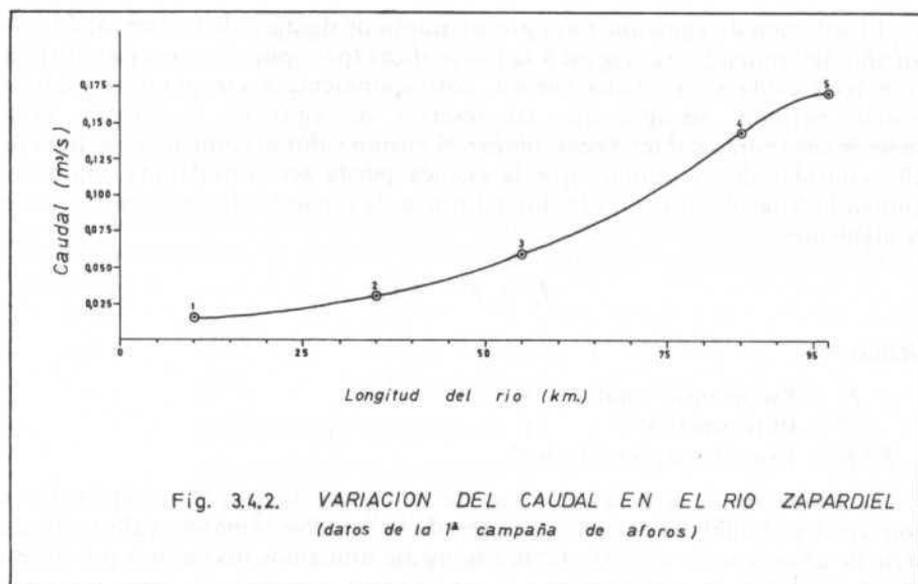


Fig. 341. ESTACIONES DE AFORO

CUENCAS DEL ZAPARDIEL
Y DE EL PERU

- ○ ○ Divisoria de aguas superficiales
- ⊙₃ Estación de aforo, con su nº



Durante la segunda campaña de aforos únicamente se pudo aforar en dos puntos, ya que aguas arriba de Torrecilla del Valle el río estaba seco. Se puede observar que en Tordesillas (estación n.º 5) el río parecía haber perdido, aproximadamente, un 50 % del caudal que llevaba en Torrecilla del Valle (estación n.º 4). Podemos pensar en una posible pérdida del caudal por infiltración, al coincidir esta campaña de aforos con la situación más baja del nivel piezométrico regional.

Los valores obtenidos en ambas campañas de aforos, en la desembocadura del río, en Tordesillas, son: $0,170 \text{ m}^3/\text{s}$ en la primera campaña y de $0,050 \text{ m}^3/\text{s}$ en la segunda, correspondientes, respectivamente, a un caudal específico de $0,12 \text{ l/s} \times \text{Km}^2$ y $0,03 \text{ l/s} \times \text{Km}^2$.

3.5. BALANCE HIDRICO

3.5.1. Introducción

En el apartado anterior hemos visto que los datos de aforos disponibles son prácticamente nulos. De aquí la necesidad de hacer una estimación de los caudales que lleva el río, a partir de la aplicación *a priori* de la fórmula del balance hídrico. A pesar de las simplificaciones y coeficientes difíciles de determinar, este método es el que mejor tiene en cuenta la realidad física de la cuenca, siendo el más adecuado para completar los datos de aforo cuando no existen, como sucede en este caso.

El volumen de agua que pasa por un punto de desagüe de la cuenca, durante un año determinado, será igual a la lluvia eficaz (precipitación - evapotranspiración real) caída sobre dicha cuenca, correspondiente a ese punto, durante el mismo período, siempre que las reservas de agua en la cuenca, tanto superficiales como subterráneas, tengan el mismo valor al comienzo y al final del año considerado, y siempre que la cuenca pueda ser considerada como una unidad hidrogeológica cerrada. En definitiva, la ecuación del balance hídrico es la siguiente:

$$E_t = P - ETR$$

siendo:

E_t = Escorrentía total.

P = Pluviometría.

ETR = Evapotranspiración real.

El problema de que las reservas de la cuenca tengan el mismo valor al comienzo y al final del período considerado se resuelve tomando valores de una serie de años, con lo cual al calcular la media anulamos los valores por exceso con los valores por defecto.

Respecto a que podamos considerar la cuenca como una unidad hidrogeológica cerrada diremos que, en principio, a pesar de la naturaleza permeable o semipermeable de estos materiales terciarios, no existe ningún motivo para pensar lo contrario. Y tal como veremos más adelante, al estudiar las isopiezas, parece que existe una divisoria piezométrica aproximadamente coincidente con la superficial.

3.5.2. Caudales estimados a partir de las variables hidrometeorológicas

El volumen de agua aprovechado anualmente por la zona, calculado en el subapartado 3.3.4., puesto en forma de caudal medio y de caudal específico, es el siguiente:

	Zapardiel	El Perú	Total
Aportación anual (Hm ³ /año) ...	74,7	12,6	87,3
Caudal anual medio (m ³ /s)	2,4	0,4	2,8
Caudal específico (l/s × Km ²)	1,7	1,9	1,7

Una vez conocida la aportación anual, por medio de tablas, se puede calcular de modo aproximado la variación del caudal a lo largo del año, obteniendo los «caudales característicos relativos», según el clima existente en la región. Antes, digamos que los «caudales característicos» son los siguientes:

- Caudal característico máximo (Q_{CM}): el caudal rebasado 10 días al año.

- Caudal característico de 1, 3, 6, 9 u 11 meses (QC_1 , QC_3 , QC_6 , QC_9 ó QC_{11}): los caudales rebasados 1, 3, 6, 9 u 11 meses al año.
- Caudal característico de sequía (QCS): el caudal rebasado 355 días al año.

En nuestro caso, considerando un clima pluvial mediterráneo, PARDE (en REMENIERAS, 1971, p. 334) da la siguiente tabla de «caudales característicos relativos»:

QCS	= 0,01 a 0,10 A
QC_{11}	= 0,05 a 0,15 A
QC_9 (75 %)	= 0,08 a 0,20 A
QC_6 (50 %)	= 0,30 a 0,50 A
QC_3 (25 %)	= 0,80 a 1,00 A
QC_1	= 2,50 a 3,00 A
QCM	= 5,00 a 6,50 A

siendo A = caudal anual medio.

Por tanto, los «caudales característicos» en nuestra zona serán los siguientes:

	Zapardiel	El Perú
Aportación anual (Hm ³).	74,7	12,6
Caudal medio (m ³ /s)....	2,4	0,4
QCS	0,024 a 0,24	0,004 a 0,040
QC_{11}	0,120 a 0,360	0,020 a 0,060
QC_9	0,192 a 0,480	0,032 a 0,080
QC_6	0,720 a 1,200	0,120 a 0,200
QC_3	1,920 a 2,400	0,320 a 0,400
QC_1	6,000 a 7,200	1,000 a 1,200
QCM	12,000 a 15,600	2,000 a 2,600

3.5.3. Comparación de estos caudales estimados con los datos de aforos

En principio, estos valores de caudales estimados según la fórmula del balance hídrico no son comparables con los datos de aforos directos. Estos últimos corresponden a dos medidas puntuales, hechas dos días concretos de un determinado año, mientras que aquéllos se trata de caudales estimados para una media obtenida a lo largo de varios años. Por otra parte no sabemos a qué caudal característico van a corresponder estos valores puntuales aforados directamente, al no conocer el caudal del río durante los restantes días del año.

De cualquier manera, parece ser que los caudales estimados a partir de la fórmula del balance hídrico son algo mayores a los aforados directamente aunque, repetimos, es arriesgado establecer comparaciones ya que únicamente disponemos de dos valores puntuales, y por otro lado los métodos empíricos utilizados para obtener la fórmula del balance hídrico pueden estar afectados de errores importantes.

Si esto es cierto, que el río lleva menos caudal que el calculado teóricamente, se puede pensar en un trasvase subterráneo a otras cuencas vecinas, pero ya hemos visto que no hay ningún motivo para pensar en esta posibilidad, por lo que nos inclinamos a pensar que exista un flujo subterráneo hacia el río Duero, tal como veremos al estudiar las isopiezas.

CAPITULO 4

GEOLOGIA

4.1. INTRODUCCION

En el presente capítulo nos hemos limitado a hacer una recopilación de los datos existentes acerca de la geología de la Cuenca, interesándonos principalmente en el terciario, que, además de ocupar la mayor extensión de la zona de estudio, constituye los únicos materiales con interés hidrogeológico.

Las propiedades acuíferas de estos materiales van a estar controladas facialmente. Por tanto, es fundamental tener un conocimiento lo más profundo posible de la estratigrafía y sedimentología de estos depósitos, si queremos poseer una idea clara de la hidrogeología regional, y poder llegar de este modo a establecer un modelo conceptual de prospección hidrogeológica.

Las columnas estratigráficas establecidas a partir de los datos de sondeos, al ser integradas en el espacio, permiten confeccionar un mapa de facies, ya que no sólo nos interesa la identificación de un determinado nivel acuífero sino también su extensión en el espacio. En realidad los mapas de facies así construidos no son tales, sino que deberían de llamarse mapas estadísticos (SANCHEZ DE LA TORRE, 1972).

Este estudio de la geología a partir de los datos de sondeos, por su complejidad y amplitud, rebasa los límites del presente trabajo, y será objeto de un posterior estudio. En el presente capítulo únicamente pretendemos dar una idea global del marco geológico regional.

En la Figura 4.1.1. esquematizamos la geología de la zona, basándonos principalmente en la Hoja nº 29 (Valladolid) y 37 (Salamanca), a escala 1:200.000, del Mapa Geológico Nacional, así como en el Mapa Geológico de la Cuenca del Duero, realizado por AERO SERVICE.

4.2. PALEOZOICO

Los materiales paleozoicos existentes al Sur de la zona, en la cabecera del río Zapardiel, constituyen el zócalo sobre el que se apoya el Terciario.

La primera descripción de estos materiales fue hecha por CASIANO DEL PRADO (1862), y posteriormente, por MARTIN DONAYRE (1879). Ambos autores, al igual que MALLADA (1927), admiten la existencia de una sedimentación cámbrica en esta zona.

Esta idea ha sido mantenida, en general, por todos los autores que han estudiado el Sistema Central Español.

Quizás los trabajos más interesantes se deban a CAPOTE y VEGAS (1968), CAPOTE y FERNANDEZ CASALS (1971) y CAPOTE (1971), todos ellos referidos a esta área metamórfica situada al Norte de la provincia de Avila.

Se trata de pizarras arcillosas y calcoesquistos de color verdoso con algún lentejón de cuarcitas, cuya edad, como ya hemos indicado anteriormente, ha sido atribuida al Cámbrico.

4.3. TERCIARIO

Los sedimentos terciarios, tal como se puede apreciar en la Figura 4.1.1., ocupan la mayor extensión de la zona de estudio.

La bibliografía existente sobre la geología de la zona es numerosa, si bien la mayor parte de estos trabajos se refieren a la datación cronológica de estos sedimentos.

ROYO GOMEZ (1933) confirma la edad miocena de estos depósitos. Describe la presencia de dos niveles: uno inferior correspondiente al Tortoniense y un nivel superior datado como Pontiense.

CRUSAFONT y VILLALTA (1954) señalan la posibilidad de llegar a diferenciar dos niveles en el Pontiense de la Meseta castellana: un nivel inferior o Vallesiense y un nivel superior Pontiense s. str. o Pannoniense, con fauna más moderna.

Posteriormente, CRUSAFONT y TRUYOLS (1960 a, 1960 b) siguen considerando el Vallesiense como Pontiense inferior, si bien señalan que el Pontiense inferior de la meseta poseería un carácter más marcado que el Vallesiense catalán.

La aparición de nuevos ejemplares fósiles en Arévalo permite asignar a estos sedimentos una edad Vallesiense (CRUSAFONT, AGUIRRE y GARCIA, 1968). Posteriores trabajos han venido a confirmar la edad Mioceno superior de los mismos (GARCIA y ALBERDI, 1968). Asimismo, en Coca (Segovia), JIMENEZ (1971), data nuevas especies fósiles, por comparación con las de Arévalo, comprobando la edad Vindoboniense-Pontiense inferior de estos sedimentos de la meseta castellana.

No obstante, y tal como veremos más adelante, hemos de señalar que el Neógeno de esta región comienza por unos depósitos de edad Mioceno inferior.

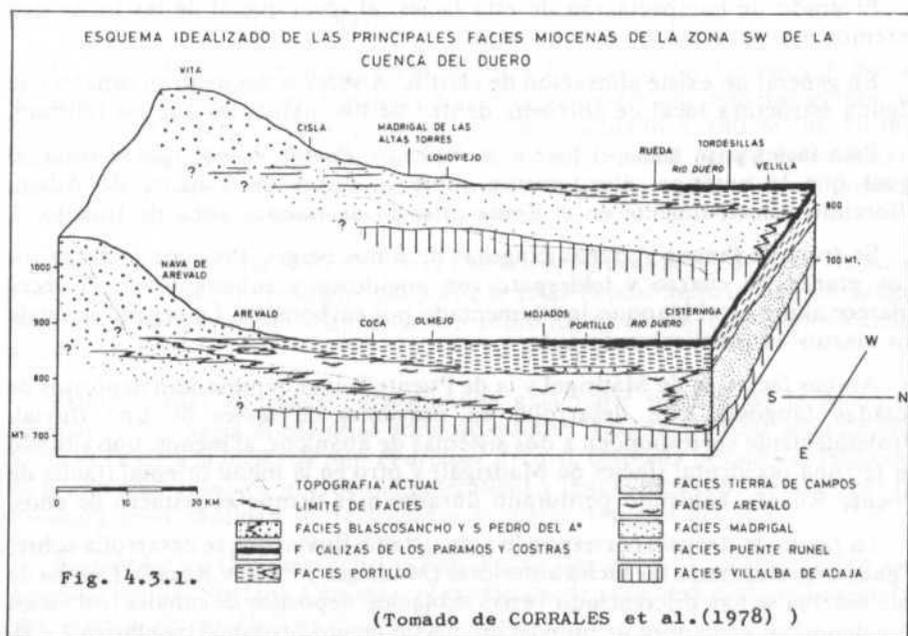
Desde el punto de vista lito-estratigráfico la literatura geológica ha venido considerando en la región dos tipos de facies miocenas: la facies Rueda y la facies Arévalo (AERO SERVICE, 1967. GARCIA ABBAD y REY SALGADO, 1973. M.O.P., 1973 a, 1973 b. I.G.M.E., 1972).

Posteriormente, POL et al. (1977) consideran estas facies anteriores como subfacies Arévalo y subfacies Rueda, englobadas ambas dentro de lo que dichos autores denominan las facies arenosas de estos depósitos terciarios.

El último trabajo existente, hasta la actualidad, se debe a CORRALES et al. (1978). Estos autores han sido los primeros que han comenzado a estudiar con detalle estos depósitos. Definen varios tipos de facies, dentro del Mioceno, en función de su litología, génesis y posición estratigráfica, así como la relación entre ellas (Figura 4.3.1.).

La facies más inferior se apoya disconformemente sobre el Paleógeno, estando asimismo en disconformidad con el resto de materiales que la recubren. Se trata de la *facies de Villalba de Adaja*, una de cuyas principales características es el grado de compactación que posee, similar al de los depósitos paleógenos.

Se trata de areniscas fangosas o fangos arenosos, de tonalidades rojizas con parches verdes. A veces se encuentran señales de procesos edáficos. El límite



superior constituye una superficie de erosión que controla el fondo del valle del río Zapardiel, siendo asimismo la causante del gran número de lavajos y fuentes que aparecen en la zona.

Existen afloramientos importantes en Medina del Campo y Tordesillas. La potencia máxima observada es de 30 metros.

SALVADOR (1977), atribuye a estos sedimentos una edad Mioceno inferior, en Tordesillas, por correlación con sedimentos de esta edad en Toro (CORROCHANO, 1977).

Las facies paleógenas sobre las que se apoyan son de edad post-Ludiense (JIMENEZ, 1977). En cuanto a la edad del resto de sedimentos que la recubren se les atribuye al Vallesiense, según hemos visto anteriormente.

Esta facies de Villalba de Adaja, al menos en la parte septentrional, constituye el sustrato sobre el que se apoya el resto del Mioceno. Es interpretada, en conjunto, como un depósito de coladas de fango, que en ocasiones presenta tramos canalizados. Se observa, sobre todo en las coladas superiores, una buena organización interna.

Hacia la zona sur-occidental, y encima de la facies Villalba de Adaja, se sitúa la *facies de Madrigal de las Altas Torres*. Está constituida por sedimentos fangosos, de color verde grisáceo, con granos de arena subangulosos, de tamaño variable, y cantos, presentando gran cantidad de feldespatos.

El grado de compactación de esta facies, al igual que el de las facies que veremos a continuación, es muy bajo.

En general no existe alineación de clastos. A veces se encuentran canales con alguna estructura local de corriente dentro de los materiales que los rellenan.

Esta facies pasa hacia el Este a la *facies de Puente Runel*, que se sitúa, al igual que la anterior, directamente sobre la facies de Villalba de Adaja, aflorando principalmente en el límite oriental de nuestra zona de trabajo.

Se trata de fangos y arenas fangosas de tonos beige. Presenta feldespatos. Los granos de cuarzo y feldespato son angulosos y subangulosos. A veces aparece algún nivel blanquecino cementado por carbonatos. La organización de los clastos es prácticamente nula.

Ambas facies, la de Madrigal y la de Puente Runel, representan depósitos de coladas fangosas, con desarrollo en ocasiones de facies de tipo fluvial. Probablemente corresponden a dos sistemas de abanicos, al menos: uno situado en la zona occidental (facies de Madrigal) y otro en la mitad oriental (facies de Puente Runel), habiendo perdurado durante más tiempo el primero de ellos.

La *facies de Arévalo* corresponde a un sistema fluvial que se desarrolla sobre, y pasa lateralmente, a las facies anteriores (Madrigal y Puente Runel). Dentro de este sistema se han diferenciado varias subfacies: depósitos de canales (subfacies 1) y depósitos de llanura de inundación más o menos proximal (subfacies 2 y 3).

La *subfacies 1* está formada por arenas sueltas, bien lavadas, de grano grueso a muy grueso, subredondeadas, de color blanquecino. Presenta estratificación cruzada en surco a mediana escala. Aflora en Arévalo y Ataquines.

La *subfacies 2* está constituida por una alternancia de arcillas y fangos arenosos verdes, con arenas verdes y amarillentas, bien lavadas y calibradas. Suele presentar estructuras de ripples, de carga, así como de escape de flúidos y niveles pequeños de materia orgánica.

La *subfacies 3* está compuesta fundamentalmente por arcillas verdes, presentando localmente intercalaciones de limos verdes, micáceos, con laminaciones cruzadas debidas a ripples.

Encima de la facies de Madrigal, en la zona occidental, y de la facies de Arévalo, en la zona oriental, se sitúa la *facies de Portillo*, íntimamente relacionada con las dos anteriores.

Está formada por arcillas y limos muy finos, blancos a blancos grisáceos, dolomíticos, a veces laminados y con estructuras de ripples. Presenta intercalaciones de calizas y yesos, así como costras brechicas. Localmente puede presentar placas de chert.

Esta facies representa ya zonas con carácter evaporítico, que pueden asimilarse a un medio de playa.

La facies Portillo culmina con la *facies de Calizas de los Páramos* de escaso desarrollo en esta zona. Hacia el Sur está representada esta facies por un delgado nivel calcáreo que presenta pisolitos, situado a 840 m. de altitud. Existen otros dos niveles, uno a 860 m., y otro a 880 m. de color blanco amarillentos, algo arenosos. Estos tres niveles llegan hasta Fontiveros, desarrollándose sobre ellos superficies morfológicas.

Mientras que hacia el Centro de la Cuenca del Duero se encuentran las facies anteriores, en las proximidades del borde se están depositando coladas de fango, llegando a apoyarse esta sedimentación sobre los niveles de carbonatos citados anteriormente.

Estas coladas de fango corresponden a la parte inferior de la *facies de Blascosancho*, hacia el SE de la zona de estudio. Esta facies pasa lateralmente hacia el Oeste a la *facies de San Pedro del Arroyo*, formada por arenas fangosas, de grano muy grueso a microconglomeráticas y fangos arenosos de color pardo. Presenta gran cantidad de feldespatos y cuarzo tamaño gravilla.

Ambas facies (Blascosancho y San Pedro del Arroyo) representarían una reactivación del Sistema Central y el comienzo de un nuevo ciclo sedimentario por encima de las Calizas de los Páramos.

4.4. CUATERNARIO

En la Figura 4.1.1. dentro del cuaternario hemos distinguido los siguientes depósitos:

- a) *Indiferenciado*. Dentro de este término hemos englobado las terrazas de la margen izquierda del río Duero, existentes al Norte de la zona; los depósitos eólicos y las formaciones de gravas cuarcíticas dadas por algunos autores como plio-cuaternario (I.G.M.E., 1972, M.O.P., 1973 a, 1973 b).

Según estos trabajos del M.O.P., las terrazas existentes están formadas por gravas cuarcíticas, bien graduadas, con una matriz limo-arenosa, pudiendo presentar en ocasiones lentejones de arena de grado medio y grueso de tono amarillento.

Los depósitos eólicos son arenas fundamentalmente cuarzosas y mal graduadas, con algunos granos de feldespato, bien redondeados, de color blanco amarillento. A veces están localmente fijadas por la vegetación.

Las formaciones que han sido dadas como pliocuaternarias son gravas cuarcíticas mal graduadas, con una matriz areno-arcillosa de tonos rojizos, presentando cementaciones locales por carbonatos hacia el techo de la formación.

- b) *Aluvial*. Los depósitos aluviales se localizan en el lecho del río Zapardiel y arroyos tributarios. Se trata de suelos de naturaleza limo-arcillosa con lentejones de arenas bien graduadas y cantos dispersos.

CAPITULO 5

HIDROGEOLOGIA

5.1. INTRODUCCION

5.1.1. Objetivos

El objetivo del presente capítulo es el estudio de las características hidrogeológicas de los materiales terciarios que constituyen los acuíferos profundos.

Esto, junto con los conocimientos climatológicos, hidrológicos y geológicos, expuestos en capítulos anteriores, nos va a permitir hacer una síntesis hidrogeológica de la zona de estudio.

Las características hidrogeológicas que se estudian en el presente capítulo son las siguientes:

- Geometría y naturaleza litológica de los acuíferos.
- Piezometría.
- Explotación de los acuíferos: características de las captaciones existentes.
- Propiedades hidráulicas de los acuíferos.
- Calidad química del agua subterránea.
- Recarga, descarga y movimiento del agua subterránea.

5.1.2. Características del sistema acuífero

Como ya hemos indicado anteriormente, en el presente capítulo nos vamos a referir únicamente a los acuíferos terciarios profundos, que son los que tienen mayor importancia hidrogeológica.

Antes de comenzar la descripción de estos acuíferos hemos de señalar brevemente la existencia de un acuífero superficial que ha tenido una gran importancia hasta hace unos años, ya que en la actualidad su explotación es prácticamente nula.

Dicho acuífero superficial se extiende por la zona de «La Moraña», abarcando parte de las hojas topográficas, escala 1:50.000, números 427, 428, 454 y 455.

Se trata de una formación muy permeable, fundamentalmente arenosa, de poco espesor saturado, en general variable de 3 a 5 metros, aunque en ocasiones es de 0 metros. Este acuífero superficial ha estado explotado años atrás por centenares de pozos superficiales de profundidad variable, no superior a los 10 metros generalmente.

En la actualidad la explotación de dicho acuífero se reduce a muy escasas captaciones que explotan caudales inferiores a 1 l/s. Esto es debido a la sobreexplotación que sufrió dicho acuífero y al incremento, en los últimos años, de los sondeos profundos lo que ha supuesto un descenso del nivel piezométrico regional.

En cuanto al sistema acuífero profundo digamos que su potencia oscila entre la profundidad a la que encontramos el nivel saturado, próximo a 50 metros según las zonas, y la profundidad a la que se está explotando actualmente dicho acuífero, que se puede considerar de 300 metros. Hemos de señalar que el sondeo más profundo existente en toda la zona de estudio se encuentra en Horcajo de las Torres (Hoja topográfica, escala 1:50.000, nº 454), con 600 metros de profundidad, atravesando todo él materiales terciarios.

Los límites externos de estos acuíferos profundos corresponden al total de la zona de estudio. Únicamente el límite Sur tiene significado hidrogeológico al estar formado por materiales paleozoicos, de características distintas a las que aquí se estudian.

Es necesario indicar que dichos acuíferos profundos pertenecen al sistema acuífero quizás más complicado y difícil de todo el país (PORRAS MARTIN, 1973). De acuerdo con LOPEZ VERA (1977), que ha estudiado la hidrogeología de cuencas terciarias similares a la que aquí nos ocupa, hemos de indicar que el conocimiento del medio sedimentario va a ser decisivo, ya que la geometría, heterogeneidades y anisotropías de las propiedades acuíferas de estos depósitos están controladas facialmente.

Una buena sedimentología hecha a partir de los datos de columnas obtenidas por los sondeos, con el fin de hacer un estudio más detallado del modelo sedimentario, contribuiría a disponer de una infraestructura geológica suficiente sobre la que basar el estudio hidrogeológico. Lógicamente éste no es el objetivo del presente estudio, ya que únicamente pretendemos llegar a conocer la hidrogeología regional a partir de los conocimientos geológicos existentes.

El Mioceno constituye un acuífero complejo formado por multitud de capas lenticulares de gravas y arenas englobadas en una matriz limo-arcillosa con un

grado variable de interconexión hidráulica y dotadas cada una de ellas de características hidráulicas propias. Debido a la complejidad estratigráfica de estos materiales terciarios, resulta imposible intentar el estudio particular de cada nivel acuífero, aceptando la hipótesis simplificativa de que el Mioceno se comporta a escala regional como un único acuífero, aunque heterogéneo y anisótropo.

Pensamos que el almacenamiento de agua en las capas semiconfinantes va a ser importante produciéndose un drenaje vertical (*leakage*) hacia los canales que constituyen los acuíferos a través de los niveles arcillosos, que en realidad no son absolutamente impermeables. En resumen, digamos que estas capas lenticulares de gravas y arenas constituirían el acuífero, estando semiconfinado por acuitardos (arcillas arenosas, etc.).

5.2. PIEZOMETRIA

5.2.1. Introducción

En el presente apartado realizamos el estudio de la piezometría de los acuíferos terciarios profundos con el fin de conocer el movimiento y funcionamiento de las aguas en dicho sistema acuífero.

A continuación hacemos un análisis de la evolución de los niveles piezométricos a lo largo del tiempo mediante el estudio de los hidrogramas correspondientes a los piezómetros considerados, así como la variación interanual de estos niveles piezométricos.

Finalmente realizamos un pequeño comentario acerca de las pequeñas áreas de surgencia existentes en la zona de estudio.

5.2.2. Mapas piezométricos

El conocimiento de la superficie piezométrica de un acuífero, es decir, del lugar geométrico del nivel que alcanzaría el agua en un pozo o tubo que penetrase en el acuífero, es uno de los elementos más importantes para llegar a conocer el movimiento y comportamiento de las aguas subterráneas en dicho acuífero y su relación con las aguas superficiales o con otros acuíferos.

Con el fin de poder conocer la superficie piezométrica, y trazar las isopiezas o líneas de igual altura piezométrica, de los acuíferos profundos se han medido mensualmente, en la mayoría de los casos, los niveles piezométricos correspondientes a 36 puntos distribuidos geográficamente por toda la zona.

Hemos de señalar que normalmente hemos utilizado como piezómetros sondeos que no se explotan en la actualidad. Cuando ésto no ha sido posible hemos recurrido a sondeos existentes que se utilizan para bombear, midiendo siempre niveles estáticos, lo cual a veces, en verano, resulta bastante difícil debido al bombeo más o menos continuo que existe durante la época de riegos.

Los 36 puntos de agua utilizados como piezómetros tienen profundidades comprendidas entre 90 y 250 metros, estando 24 de ellas entre 100 y 200 metros de profundidad.

Aparentemente parece ser que no existe una relación clara entre la profundidad de un pozo (1) y su nivel piezométrico, especialmente en la zona central de la cuenca, mucho más abundante en datos que el resto. De hecho al ir avanzando en la perforación cuando alcanzamos una determinada profundidad, en la que sepamos con certeza que el nivel piezométrico corresponde al acuífero profundo, parece ser que el nivel piezométrico, a partir de aquí, ya no sufre variaciones importantes. Lógicamente es imposible estar continuamente midiendo el nivel piezométrico a medida que avanza la perforación, lo que hace que las posibles pequeñas variaciones del nivel piezométrico no puedan conocerse con exactitud.

Sin embargo, parece ser que en el Sur y Norte de la zona existen variaciones importantes del nivel piezométrico en la misma vertical. Mientras que al Sur el nivel piezométrico desciende a medida que aumenta la profundidad, en el Norte de la zona sucede lo contrario, es decir, el nivel piezométrico asciende al aumentar la profundidad, lo que indica que debe existir un componente vertical del flujo descendente en la zona Sur y ascendente en la zona Norte, en las proximidades del Duero.

Resulta totalmente imposible realizar una correlación entre los diferentes niveles permeables debido a los frecuentes cambios laterales de facies. De aquí que consideremos el conjunto de niveles acuíferos como un solo acuífero, cuyo nivel piezométrico es el equivalente a la presión media de los distintos niveles acuíferos atravesados.

En la Tabla 5.2.1. se pueden ver los valores de los niveles piezométricos correspondientes a los 36 piezómetros considerados, referentes a los meses de abril y octubre de 1978, junto con sus correspondientes profundidades y las cotas topográficas y absolutas, así como la variación de los niveles entre los dos meses citados anteriormente.

Con estos valores se han dibujado dos mapas de isopiezas. El primero correspondiente al mes de abril de 1978 (Figura 5.2.1.) y el segundo al mes de octubre de 1978 (Figura 5.2.2.), por coincidir ambos meses con el inicio y el fin de la campaña de riegos respectivamente, es decir, coincidiendo con las dos variaciones extremas del nivel piezométrico regional.

En ambos mapas podemos observar como la superficie piezométrica sigue en líneas generales la configuración topográfica, existiendo un gradiente hidráulico que pone de manifiesto un flujo subterráneo desde el borde Sur de la cuenca hasta el río Duero, considerando, como ya hemos indicado anteriormente, que este flujo tiene una componente vertical descendente en la zona Sur de la cuenca y ascendente en la zona Norte.

(1) Normalmente la palabra «pozo» la utilizaremos para referirnos a un sondeo profundo.

En el mapa piezométrico correspondiente a octubre de 1978 (Figura 5.2.2.), podemos observar que en la zona central de la cuenca las curvas isopiezas se hacen sinuosas, no adaptándose a la red superficial de drenaje. Esto es debido a que en esta zona se produce la mayor explotación de agua subterránea de toda la cuenca, lo que va a influir en la piezometría, hecho puesto ya de manifiesto por PORRAS MARTIN (1973).

Asimismo en los mapas de isopiezas apreciamos que en el Sur son más bajas las permeabilidades que en el resto, al estar más juntas las líneas isopiezas, igual que sucede, aunque en menos grado, en la zona Norte.

5.2.3. Evolución de los niveles piezométricos

Con el fin de hacer un estudio acerca de la evolución en el tiempo de los niveles piezométricos, hemos efectuado medidas mensuales en los piezómetros señalados anteriormente. Esta variación de los niveles piezométricos a lo largo del tiempo se representa mediante hidrogramas, en los cuales podemos determinar también la tendencia a la evolución, positiva o negativa, de los niveles piezométricos.

Lógicamente, la forma de los hidrogramas va a variar de unos piezómetros a otros, dependiendo fundamentalmente de la zona donde estén enclavados los mismos. De modo general, puede decirse que en los hidrogramas trazados en cada uno de los piezómetros considerados, los niveles piezométricos alcanzan un valor máximo en los meses de abril-mayo, y un valor mínimo en los meses de septiembre-octubre, existiendo una variación cíclica de los niveles piezométricos.

A continuación vamos a estudiar los hidrogramas correspondientes a cuatro piezómetros representativos, distribuidos geográficamente por toda la zona de estudio: hidrograma correspondiente al piezómetro nº 2 (Rueda) situado en la mitad Norte, hidrogramas de los piezómetros nº 17 (Fuente el Sol) y nº 25 (Madrigal de las Altas Torres) ambos situados en la zona central, e hidrograma del piezómetro nº 36 (Cabezas de Alambre) situado en la mitad Sur.

En el hidrograma nº 1 (Rueda) observamos que el nivel piezométrico más elevado se alcanza en los meses de mayo-junio comenzando la descarga del acuífero hasta los primeros días de septiembre, ascendiendo rápidamente hasta diciembre, a partir de cuyo mes sigue ascendiendo hasta mayo a menos velocidad. Podemos observar una ligera tendencia a la disminución del nivel piezométrico en los meses de verano (Figura 5.2.3.).

En el hidrograma nº 2 (Fuente el Sol) se alcanza el nivel máximo en el mes de Abril descendiendo rápidamente hasta el mes de septiembre, en el que comienza una rápida recuperación hasta octubre, mes a partir del cual se recupera más lentamente hasta el mes de Abril (Figura 5.2.4.).

En el hidrograma nº 3 (Madrigal de las Altas Torres) se presenta el máximo en el mes de Abril y el mínimo en los meses de Septiembre-Octubre, siendo la variación de alguna decena de metros. Esto es debido a que este piezómetro se

TABLA 5.2.1.

NIVELES PIEZOMETRICOS. ABRIL Y OCTUBRE DE 1978

Número	Nº Hoja-Octante	Profundidad Piezómetro (m)	Cota (m) Topográfica	Abril, 1978		Octubre, 1978		Variación AB-OC,78 (m)
				Nivel (m) Piezométrico	Cota (m) Absoluta	Nivel (m) Piezométrico	Cota (m) Absoluta	
1	399-2	190	664	+ 6,60	671	+ 2,15	666	- 4
2	399-3	200	710	-28,03	682	-31,42	679	- 3
3	399-4	250	750	-38,35	712	-40,81	709	- 3
4	399-4	130	735	-18,81	716	-21,32	714	- 2
5	399-7	200	700	- 6,59	693	-12,04	688	- 5
6	399-8	114	770	-39,98	730	-47,61	722	- 8
7	400-1	250	720	-13,33	707	-25,44	695	-12
8	400-5	102	735	-19,83	715	-20,93	714	- 1
9	400-5	134	762	-46,18	716	-48,17	714	- 2
10	427-1	150	735	- 7,49	728	- 8,84	726	- 2
11	427-3	250	715	+ 3,10	718	-	-	> 3
12	427-4	100	723	- 6,27	717	-17,69	705	-12
13	427-4	140	730	- 4,72	725	-25,29	704	-21
14	427-5	250	760	-11,74	748	-29,98	730	-18
15	427-6	104	750	- 5,87	744	-19,39	731	-13
16	427-7	108	755	- 7,66	747	-14,19	741	- 6
17	427-8	120	760	- 6,69	753	- 8,18	752	- 1
18	428-1	200	745	-11,82	733	-13,63	731	- 2
19	428-2	90	745	-20,97	724	-21,48	724	-
20	428-5	250	795	-10,97	784	-13,06	782	- 2
21	454-1	95	795	-	-	-32,39	763	-19
22	454-2	90	800	-14,87	785	-29,09	771	-14
23	454-3	238	808	-31,24	777	-65,56	742	-25
24	454-4	104	769	- 7,01	762	-11,33	758	- 4
25	454-4	96	779	- 2,56	776	-21,29	757	-19
26	454-7	125	818	-15,62	802	-33,46	785	-17
27	454-7	100	824	-30,13	794	-57,68	766	-28
28	454-7	107	802	-15,28	787	-28,62	773	-14
29	454-8	100	800	-17,76	782	-34,46	766	-16
30	455-5	225	856	- 6,03	850	-10,17	846	- 4
31	480-3	120	857	-18,97	838	-39,29	818	-20
32	480-4	200	885	-12,61	872	-20,48	865	- 7
33	480-4	250	898	-21,75	876	-25,33	873	- 3
34	480-5	130	911	-39,83	871	-39,57	871	-
35	480-6	100	956	- 9,98	946	-11,61	944	- 2
36	481-1	170	890	-16,29	874	-18,57	871	- 3

encuentra situado en una zona donde las extracciones de agua subterránea por bombeo en la época de estiaje son muy importantes (Figura 5.2.4.).

En el hidrograma nº 4 (Cabezas de Alambre) el máximo se sitúa en el mes de mayo y el mínimo en los últimos días del mes de Septiembre, siendo la variación muy escasa. Este hidrograma es de similares características al hidrograma nº 1 situado en el Norte de la zona, diferenciándose de él en que la recuperación de los niveles se efectúa de manera constante.

En general parece existir una tendencia a la disminución interanual de los niveles piezométricos, quizás debido a que el hombre ha variado las condiciones de descarga de este acuífero, por la sobreexplotación que del mismo se efectúa en algunas zonas.

En la Figura 5.2.7. podemos observar la variación de niveles existente entre los meses de abril y octubre de 1978 al comienzo y al final de la época de riegos, valores que hemos expuesto anteriormente en la tabla 5.2.1.

En general, y tal como es de esperar, las mayores variaciones del nivel piezométrico se van a producir en aquellas zonas donde existe una mayor explotación por bombeo del acuífero (zonas de Madrigal de las Altas Torres y Medina del Campo).

5.2.4. Zonas de Surgencia

En algunas áreas bastante reducidas, donde la superficie piezométrica se encuentra por encima de la superficie topográfica, se producen pequeñas zonas de surgencia.

Actualmente se localizan dos zonas de surgencia: una en las proximidades de Pollos, en dirección a Tordesillas (hoja topográfica, escala 1:50.000, nº 399), y otra a la salida de Medina del Campo, en dirección a Nava del Rey (hoja topográfica, escala 1:50.000, nº 427). Esta segunda zona corresponde a un área de gran explotación de aguas subterráneas, con lo cual en verano los sondeos surgentes que existen en ella dejan de serlo, al descender el nivel piezométrico regional.

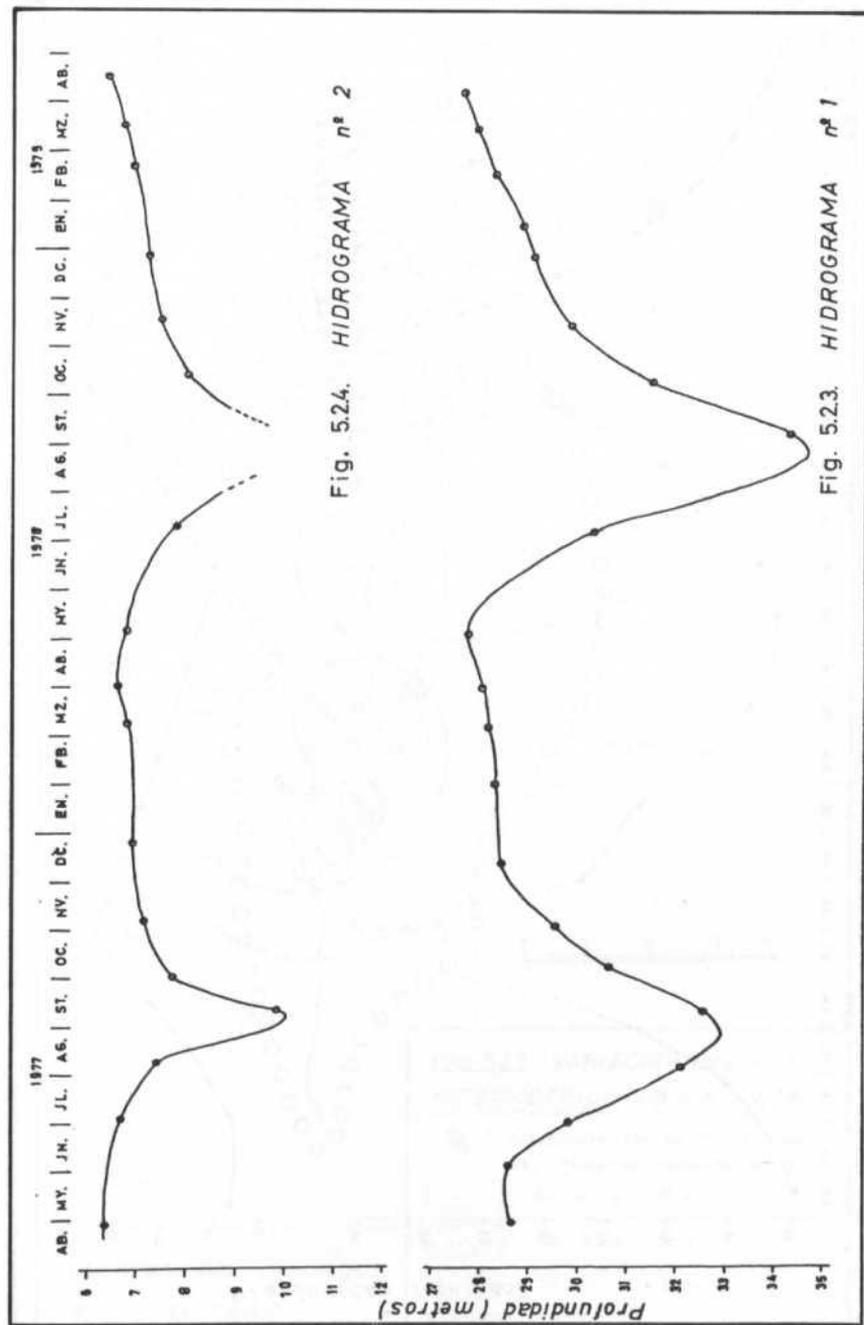
La reducida extensión de estas áreas de surgencia hace imposible su representación en un mapa.

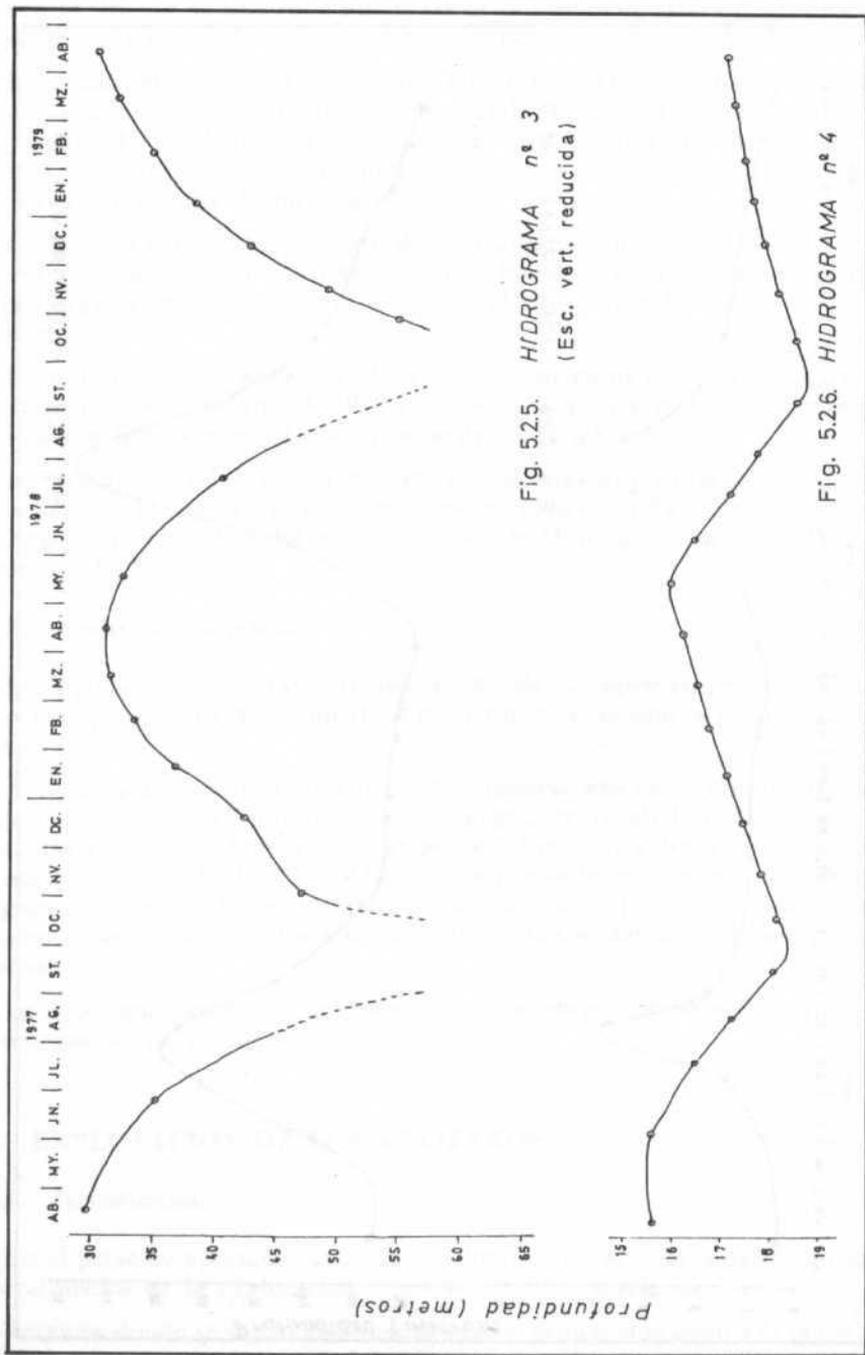
5.3. EXPLOTACION DE LOS ACUIFEROS

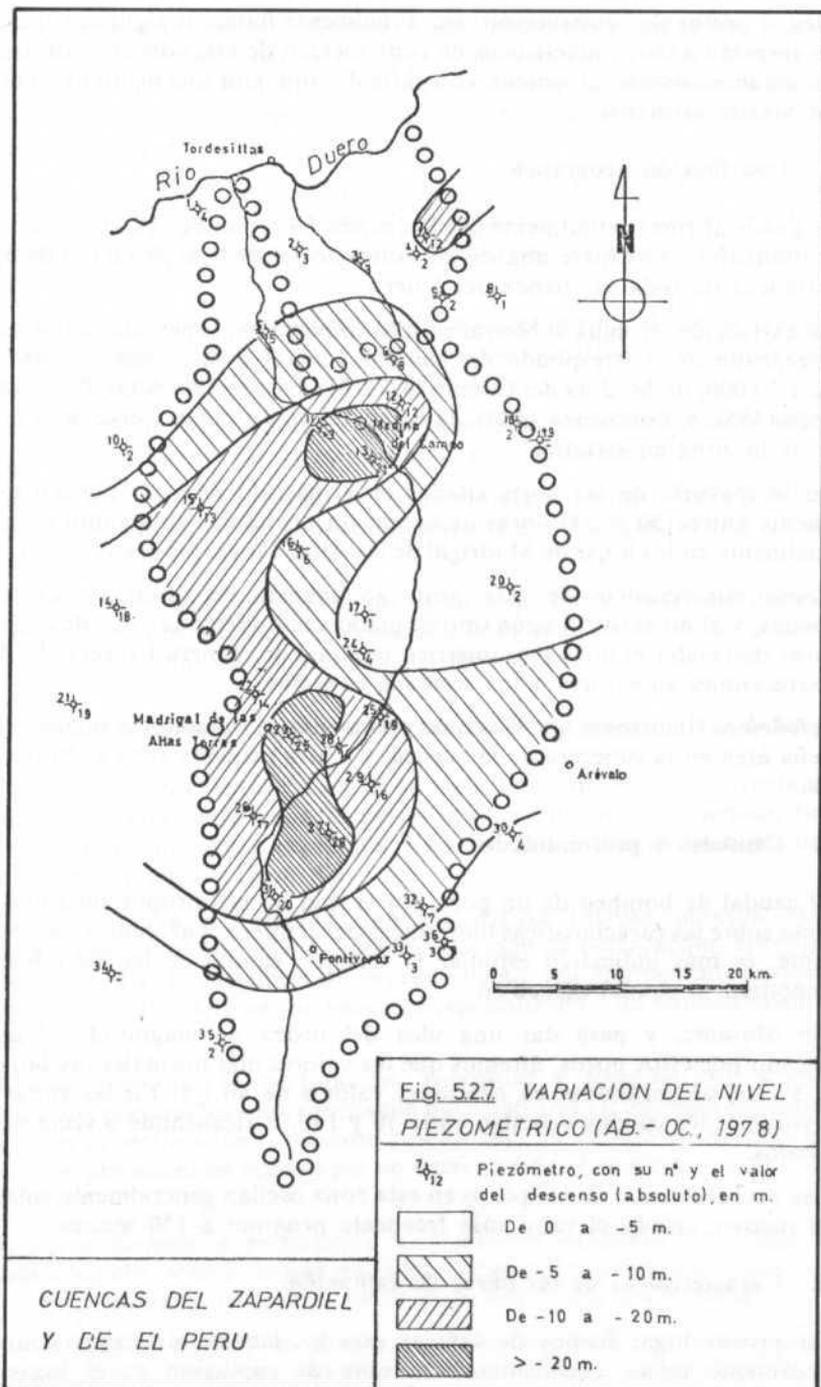
5.3.1. Introducción

En el presente apartado nos vamos a limitar únicamente a dar una visión general acerca de la explotación de estos acuíferos terciarios.

Veremos donde se sitúan las zonas de mayor explotación dentro de la cuenca junto con las características de las mismas: caudales de explotación, profun-







idades, aspectos de construcción, etc. Finalmente haremos algunas consideraciones respecto a las características de construcción de estas obras de captación, dando algunos consejos prácticos, con el fin de conseguir una mejor explotación de los niveles acuíferos.

5.3.2. Distribución geográfica

Se puede afirmar actualmente que la cuenca del Zapardiel, junto con algunas áreas limítrofes, constituye una de las zonas con mayor explotación de aguas subterráneas de toda la cuenca del Duero.

La extracción de agua subterránea más importante, repartida más o menos homogéneamente, corresponde de manera general a las hojas topográficas, escala 1:50.000, de Medina del Campo (427), Madrigal de las Altas Torres (454), Arévalo (455), y Fontiveros (480), es decir, tal como puede verse, a la mayor parte de la zona en estudio.

En la mayoría de las hojas citadas en el párrafo anterior pueden existir fácilmente entre 150 y 200 obras de captación profundas en algunos octantes, especialmente en las hojas de Madrigal de las Altas Torres (454) y Arévalo (455).

Como consecuencia de esta gran abundancia en obras de captación profundas, y al no existir ningún tipo de planificación regional, sucede el peligro de hacer descender el nivel piezométrico regional de manera irreversible, al ser las extracciones superiores a los recursos existentes.

Señalemos finalmente que las zonas con menor explotación se reducen a una pequeña área en la cabecera de la cuenca, y a otra pequeña zona al Norte de la misma.

5.3.3. Caudales y profundidades

El caudal de bombeo de un pozo por sí solo no nos proporciona una idea correcta sobre las características hidráulicas del acuífero. Tal como veremos más adelante, es más indicativo estudiar la relación caudal de bombeo-descenso piezométrico, o caudal específico.

No obstante, y para dar una idea del orden de magnitud del caudal bombeado por estos pozos, diremos que los valores más normales oscilan entre 25 y 35 l/s, alcanzándose en ocasiones valores de 40 l/s. En las zonas más desfavorables los caudales oscilan entre 10 y 15 l/s, alcanzando a veces valores más bajos.

Las profundidades de los pozos en esta zona oscilan generalmente entre 100 y 250 metros, siendo el valor más frecuente próximo a 150 metros.

5.3.4. Características de las obras de captación

En primer lugar hemos de señalar que las labores de exploración son prácticamente nulas, enclavándose la obra de captación en el lugar más

adecuado para el propietario, dentro de los límites establecidos por la ley. Los agricultores y sondistas tienen un cierto conocimiento de la «hidrogeología regional» por lo que en raras ocasiones se recurre a la presencia de algún profesional con el fin de hacer algún informe hidrogeológico o de llevar a cabo la dirección técnica de la obra de captación.

La mayoría de los sondeos que explotan los acuíferos profundos en toda la zona se perforan por el sistema de percusión, siendo pocos los sondeos perforados a rotación con circulación inversa, y aún más escasos los perforados a rotación con circulación directa.

En general, y salvo raras excepciones, el revestimiento del sondeo se lleva a cabo con tubería metálica ciega ranurada en superficie con soplete, siendo anárquica su distribución a lo largo del pozo.

Los diámetros más frecuentes de la tubería de revestimiento son 300 y 350 mm., siendo el espesor de la misma de 5 mm. normalmente.

Generalmente todos los sondeos llevan empaque de grava entre la tubería de revestimiento y la pared del sondeo. Se trata de grava elegida al azar sin ningún tipo de selección.

Una vez terminado el sondeo no se hace un buen desarrollo del mismo, limitándose las operaciones de desarrollo a la realización de un aforo para determinar el caudal de explotación del mismo.

5.3.5. Consideraciones respecto a las características constructivas de los pozos

Como ya hemos indicado en el subapartado anterior, la mayoría de los sondeos existentes en la zona se perforan a percusión. Este método tiene la ventaja de su simplicidad y economía. La velocidad de avance en la perforación suele ser del orden de 10 m/día.

La perforación a rotación con circulación inversa necesita mayores conocimientos técnicos, pero la rápida velocidad de perforación, aproximadamente 50 m/día, hacen que este procedimiento vea compensado económicamente la necesidad de tener un personal especializado y un mantenimiento más costoso.

Ambos métodos de perforación, percusión y rotación con circulación inversa, nos parecen los más adecuados para perforar en este tipo de materiales. Ya que en la perforación a rotación con circulación directa se deben tomar las suficientes precauciones como para no dejar sellado el acuífero con los lodos de perforación.

A veces durante la perforación se producen hundimientos, debidos a la inestabilidad del terreno, lo que dificulta y retrasa el avance de la misma al tener que ir introduciendo la tubería de revestimiento cada poco tiempo.

En cuanto al sistema de tubería metálica ranurada en toda su longitud, pensamos que es totalmente inadecuado para lograr una óptima eficiencia del

pozo, ya que va a permitir la entrada en el interior del mismo de material sólido. El tamaño de abertura de la rejilla debe venir condicionado por el análisis granulométrico del material atravesado por el sondeo, permitiendo que el agua entre en el pozo sin pérdida excesiva de carga e impidiendo el paso del material fino durante el bombeo.

Otro aspecto mal realizado es el empaque de grava, al no estar seleccionada ni tener una granulometría uniforme.

No tenemos ningún dato de pérdida de eficiencia de un pozo por corrosión o incrustación de la rejilla.

Una vez construido el pozo se hace imprescindible hacer un desarrollo natural del mismo con el fin de eliminar lodos de perforación, costras o cualquier otro elemento que pueda disminuir la eficiencia del pozo. Estas operaciones de desarrollo consisten en diferentes sistemas para provocar la entrada y salida de agua a través de la rejilla, con el fin de limpiar los alrededores del sondeo de elementos finos, con lo cual aumentamos la porosidad y la permeabilidad de la formación.

Pensamos por tanto, de acuerdo con LLAMAS y LOPEZ VERA (1977), que el tipo de captación adecuada para la explotación de agua subterránea en este tipo de materiales es el pozo perforado a rotación con circulación inversa, con agua limpia como fluido de perforación, empaque de grava y filtros bien dimensionados, y un enérgico desarrollo mediante aire comprimido.

5.4. PROPIEDADES HIDRAULICAS

5.4.1. Introducción

Los objetivos del presente apartado se centran fundamentalmente en obtener los parámetros hidráulicos del acuífero, lo cual nos va a permitir conocer a corto y largo plazo el comportamiento de una captación de agua, el caudal óptimo de explotación, y sus efectos sobre el acuífero y otras captaciones vecinas.

5.4.2. Caudales específicos

5.4.2.1. Introducción

El caudal de un pozo por sí solo no nos da una idea correcta acerca de la transmisividad del acuífero. De dos pozos que cortan acuíferos de diferente transmisividad podremos obtener el mismo caudal pero con descensos diferentes, de modo que lo que nos dará una idea de la transmisividad del acuífero es la relación caudal de bombeo / descenso piezométrico, o caudal específico. Siendo, por tanto, éste independiente del caudal de bombeo y únicamente depende de las características del acuífero.

Se denomina caudal específico de un pozo a la relación entre el caudal de agua bombeado y el descenso producido en el interior del pozo de bombeo,

considerando éste como la diferencia entre el nivel estático y el nivel dinámico estabilizado.

$$Q.e. = Q/s$$

siendo:

$Q.e.$ = Caudal específico, en l/s \times m lineal de descenso.

Q = Caudal de bombeo, en l/s.

s = Descenso, en metros.

El caudal específico normalmente se expresa en l/s., o m³/h., que produce un pozo por cada metro de descenso producido.

5.4.2.2. Factores que influyen sobre el caudal específico

Son varios los factores que determinan el caudal específico de un pozo. VILLARROYA GIL y REBOLLO FERREIRO (1976) señalan los siguientes:

- a) Los dependientes de los caracteres hidrogeológicos, y
- b) Los referentes a las características constructivas del pozo.

Obviamente, los caracteres hidrogeológicos del acuífero (porosidad, permeabilidad horizontal y vertical, coeficiente de almacenamiento, etc.), influyen directamente en el caudal específico del pozo. Por tanto, en principio, los mayores caudales específicos van a corresponder a los pozos que corten lentejones de arenas y gravas limpias de arcillas, es decir, que tengan porosidades y permeabilidades más elevadas.

Asimismo una buena construcción del pozo llevará consigo un aumento del caudal específico del mismo.

En esta zona, y debido a los factores ya indicados en el subapartado 5.3.5. respecto a la construcción de los pozos los datos de caudales específicos sirven para obtener un límite inferior del valor de la transmisividad, puesto que las pérdidas de carga que sufrirá el agua al penetrar en el pozo van a ser importantes.

De cualquier modo, puesto que las técnicas de construcción son análogas en la inmensa mayoría de los casos, es posible hacer una comparación entre los distintos caudales específicos, con el fin de establecer su distribución espacial.

5.4.2.3. Distribución espacial de los caudales específicos

La profundidad de un pozo, lógicamente, influye en el caudal específico del mismo, lo que nos llevó, en principio, a pensar en establecer esta distribución espacial con pozos de una determinada profundidad. No obstante, al estar la mayoría de los valores de $Q.e.$ comprendidos entre dos números, y no ser un valor exacto, pensamos que aunque hiciéramos una selección de pozos con la misma profundidad el nuevo valor de $Q.e.$ seguiría comprendido dentro de ese margen.

Como puede observarse en el mapa de caudales específicos (Figura 5.4.1.) se pueden diferenciar una serie de zonas con el mismo caudal específico, que incluyen en ellas sondeos de diferentes profundidades.

En abundantes casos, como hemos indicado anteriormente, el valor del caudal específico se ha establecido entre un cierto margen, por no poder ser calculado con exactitud, al no conocerse con precisión la medida del nivel dinámico estabilizado.

Los caudales específicos oscilan entre valores ligeramente inferiores a $1 \text{ m}^3/\text{h}\times\text{m}$, y valores próximos a $4 \text{ m}^3/\text{h}\times\text{m}$, llegando a alcanzar en algún caso valores ligeramente superiores a $6 \text{ m}^3/\text{h}\times\text{m}$.

Como puede observarse en el mapa, de manera aproximada, la mayor extensión de la Cuenca del Zapardiel tiene valores de $Q.e.$ comprendidos entre 2 y $4 \text{ m}^3/\text{h}\times\text{m}$. Las zonas con valores más bajos se localizan al Sur de la cuenca del Zapardiel y en gran parte de la cuenca del Perú. Los valores más elevados, superiores a $4 \text{ m}^3/\text{h}\times\text{m}$., se sitúan aproximadamente, en una zona comprendida entre Madrigal de las Altas Torres y Medina del Campo, en las proximidades de Arévalo y en la desembocadura del río Zapardiel.

En resumen, la distribución de los valores de $Q.e.$ no se efectúa al azar, sino que pueden distinguirse áreas más o menos favorables, respecto a este parámetro, condicionadas por la génesis y disposición de los materiales que integran la zona estudiada.

Este mapa de caudales específicos junto con los mapas de isopiezas (subapartado 5.2.2.) nos va a permitir conocer el caudal de bombeo de un punto determinado de la zona.

5.4.3. Transmisividades

5.4.3.1. Introducción

La transmisividad indica la capacidad del medio acuifero para transmitir agua en toda su altura, y representa el caudal que se filtra a través de una banda vertical de terreno de ancho unidad y de altura igual al espesor saturado, en un plano ortogonal a la dirección de flujo, cuando el gradiente hidráulico vale la unidad.

La transmisividad es el producto de la permeabilidad por el espesor saturado.

$$T = K \cdot b$$

siendo:

T = Transmisividad, en $\text{m}^2/\text{día}$.

K = Permeabilidad, en $\text{m}/\text{día}$.

b = Espesor del acuifero, en m .

Hemos de señalar que normalmente K y b son también desconocidos, con lo cual el cálculo de la transmisividad se determinará mediante bombeos de ensayo, como veremos más adelante.

5.4.3.2. *Estimación de la transmisividad a partir del caudal específico*

Los datos de transmisividad obtenidos directamente mediante bombeos de ensayo no son abundantes, debido a las dificultades que se presentan para poder realizar este tipo de pruebas.

Esta escasez de datos nos ha llevado a buscar una relación analítica entre la transmisividad y el caudal específico, al disponer de más datos de caudal específico que de transmisividad.

Esta cuestión ha sido estudiada por diversos autores con el fin de buscar una relación caudal específico-transmisividad. PORCHET (en CASTANY, 1963, p. 288) establece una ecuación para acuíferos libres. GALOFRE (1966) da una fórmula en la que relaciona ambos conceptos. LOGAN (en DAVIS y DE WIEST, 1971, p. 463) expresa asimismo, de manera aproximada, una fórmula mediante la cual se determina la transmisividad en función del caudal específico. Esta fórmula ha sido utilizada por algunos autores (SASTRE MERLIN, 1976) en acuíferos terciarios de similares características al de nuestra zona de trabajo. Aplicando esta última expresión a nuestro caso particular observamos que se obtienen valores de transmisividad ligeramente superiores a los determinados mediante bombeos de ensayo. En vista de lo cual, y tal como hemos indicado anteriormente, hemos establecido por correlación lineal la ecuación de una recta que se ajusta a una serie de puntos, de los cuales disponíamos de valor de transmisividad directamente deducida mediante un bombeo de ensayo.

En la Figura 5.4.2. se expresa gráficamente esta relación entre la transmisividad y el caudal específico de cada uno de los diez puntos considerados. Algunos de estos valores pertenecen a algún pozo situado en alguna zona limítrofe, de similares características hidrogeológicas, por lo que han podido ser usados para establecer esta relación.

Dicha ecuación es la siguiente:

$$T = 25,7 Q.e. + 3,5$$

siendo:

T = Transmisividad en $m^2/día$.

$Q.e.$ = Caudal específico en $m^3/h m.$

El ajuste de los puntos a la recta es bastante bueno, ya que el coeficiente de correlación es muy próximo a la unidad ($r = 0,93$).

En resumen, podemos decir que en esta zona el valor de transmisividad ($m^2/día$) es, aproximadamente, 25 veces superior al caudal específico, en $m^3/h \times m.$, ó 90 veces superior a este caudal en $l/s \times m.$

$$T (m^2/día) \approx 25 Q.e. m^3/h \times m \approx 90 Q.e. l/s \times m$$

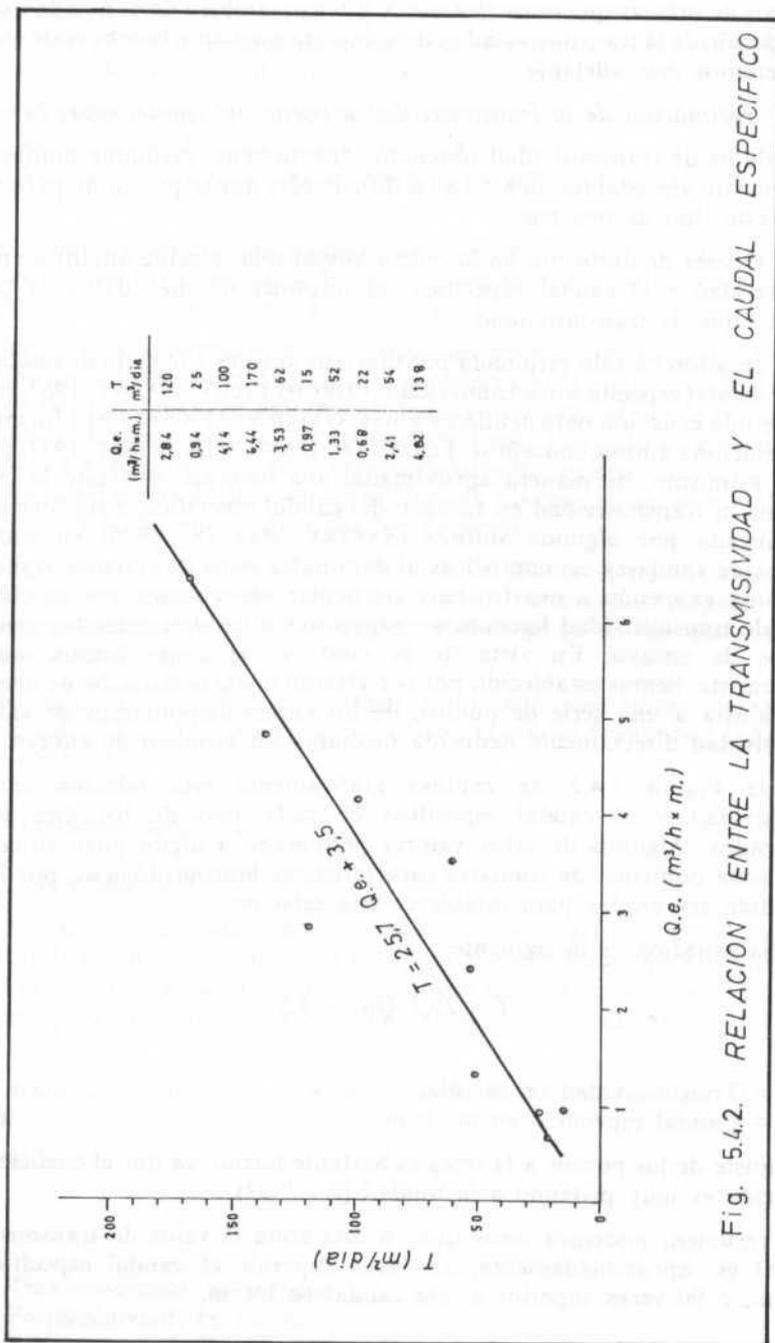


Fig. 5.4.2. RELACION ENTRE LA TRANSMISIVIDAD Y EL CAUDAL ESPECIFICO

5.4.3.3. *Cálculo de la transmisividad mediante bombeos de ensayo*

La finalidad principal del bombeo de ensayo es el comportamiento del pozo, con el fin de determinar los parámetros hidráulicos del acuífero, esencialmente la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento, o bien conocer el funcionamiento y buena construcción del pozo.

Esquemáticamente un ensayo de bombeo consiste en extraer agua de un acuífero, en condiciones predeterminadas y controladas, a través de un pozo, con lo cual van a variar los niveles piezométricos en una zona más o menos amplia del acuífero. Estos cambios son observados mediante pozos adecuadamente situados y luego son interpretados según los métodos clásicos.

En general, un bombeo de ensayo hecho correctamente resulta caro: construcción del pozo de bombeo, construcción de los piezómetros de observación, etc., etc. Lógicamente, nosotros no contamos con los medios económicos necesarios para hacer un bombeo de ensayo con dichas características. Estos inconvenientes pueden reducirse en cierto modo utilizando un pozo ya construido para hacer el bombeo de ensayo, siempre que reúna determinadas condiciones, y que existan próximos otros pozos que se puedan tomar como piezómetros para medir los descensos que se produzcan durante el bombeo.

Nos hemos limitado a realizar la medida de niveles piezométricos en el mismo pozo de bombeo, durante la realización del aforo del mismo, prueba que se suele hacer una vez finalizada la obra con el fin de determinar el caudal de explotación del pozo. En la mayoría de ocasiones no resulta fácil encontrar un pozo próximo al de bombeo, y cuando lo encontramos es frecuente que no dispongamos de datos suficientes (características del pozo, columna estratigráfica, etc.), como para poder realizar después una interpretación adecuada de los resultados.

Además de las dificultades descritas anteriormente, estos aforos o ensayos de descenso (CUSTODIO y LLAMAS, 1976, p. 904) presentan los siguientes inconvenientes:

- El lugar a realizar el pozo nunca se puede seleccionar, ya que tenemos que aprovechar los sondeos que se realicen.
- Este tipo de pozos normalmente tienen rejilla en toda su longitud y no solamente en los niveles acuíferos.
- No están limpios ni bien desarrollados, puesto que casi siempre se trata del primer bombeo que se lleva a cabo en el pozo.
- Durante el bombeo el caudal no se mantiene constante, no disponiendo además de sistemas continuos de aforo del caudal.
- El tiempo que dura el aforo, normalmente de 4 a 6 horas, no

es el suficiente para lograr la estabilidad del nivel piezométrico.

- A veces existen bombeos próximos que provocan variaciones en el nivel de agua.
- El acuífero no responde a un modelo físico sencillo, lo cual plantea dificultades a la hora de realizar una correcta interpretación de los datos.
- Al no disponer de piezómetros de observación no podemos hacer un cálculo del coeficiente de almacenamiento.

Hemos de tener en cuenta para interpretar correctamente estos resultados que los pozos son parcialmente penetrantes, con lo cual la transmisividad real va a ser superior a la transmisividad estimada.

Los datos de transmisividades deducidas mediante estos bombeos de ensayo están expuestos en la Figura 5.4.2.

A continuación, a modo de ejemplo, vamos a calcular la transmisividad a partir de un ensayo de descenso realizado el día 16-8-78, en las proximidades de Gomeznarro (hoja topográfica, escala 1:50.000, nº 428). Se trata de un sondeo de 152 metros de profundidad, de 300 mm. de diámetro, con tubería rajada en toda su longitud. La bomba durante el aforo se instaló a 71 metros de profundidad.

En la Tabla 5.4.1. se presentan los datos de este bombeo de ensayo: el tiempo, en minutos; el caudal, en m^3/h . y los descensos piezométricos, en metros.

En la Figura 5.4.3. se representan estos valores del descenso piezométrico y del tiempo, en un gráfico s-log t. Puede considerarse un ensayo escalonado, ya que el caudal va aumentando a lo largo del tiempo de bombeo.

En el gráfico pueden observarse dos tramos que pueden considerarse aproximadamente rectos: el primero correspondiente a un caudal de $70 m^3/h$., y el segundo correspondiente a un caudal de 120 metros. El período intermedio en el que se bombearon $95 m^3/h$ fue demasiado corto como para poder trazar una recta, al disponer de muy pocos puntos.

El análisis de este bombeo de ensayo mediante el método de Jacob, permite calcular la transmisividad para los dos tramos, observando cómo se obtienen valores de transmisividad muy semejantes. La ecuación es la siguiente:

$$T = 0.183 Q / (\Delta s)_{10}$$

siendo:

T = Transmisividad en $m^2/día$

Q = Caudal de bombeo, en m^3/h

$(\Delta s)_{10}$ = Descenso correspondiente a un intervalo de tiempo $t_2 = 10 t_1$

TABLA 5.4.1.
BOMBEO DE ENSAYO. DATOS NUMERICOS

Tiempo (min.)	Caudal (m ³ /h)	Prof. Agua (m)	Δ (m)	Observaciones
0	70	5,66	—	
1	70	16,34	10,68	
1,5	70	17,35	11,69	
2	70	17,95	12,29	
3	70	18,47	12,81	
4	70	18,75	13,09	
5	70	18,98	13,32	
6	70	19,24	13,58	
7	70	19,42	13,76	
8	70	19,54	13,88	
9	70	19,63	13,97	
10	70	19,72	14,06	
12	70	19,87	14,21	
14	70	19,97	14,31	
16	70	20,05	14,39	
18	70	20,13	14,47	
20	70	20,22	14,56	Después de medir en el min. 20, se acelera el motor
22	95	21,59	15,93	
24	95	22,54	16,88	
26	95	23,05	17,39	
28	95	23,07	17,41	
30	95	23,13	17,47	Después de medir en el min. 30, se acelera el motor
35	120	26,52	20,86	
40	120	26,91	21,25	
45	120	27,59	21,93	
50	120	28,11	22,45	
55	120	28,23	22,57	
60	120	28,37	22,71	
70	120	28,63	22,97	
80	120	28,89	23,23	
90	120	28,97	23,31	
100	120	29,14	23,48	
110	120	29,38	23,72	
120	120	29,45	23,79	
150	120	29,62	23,96	

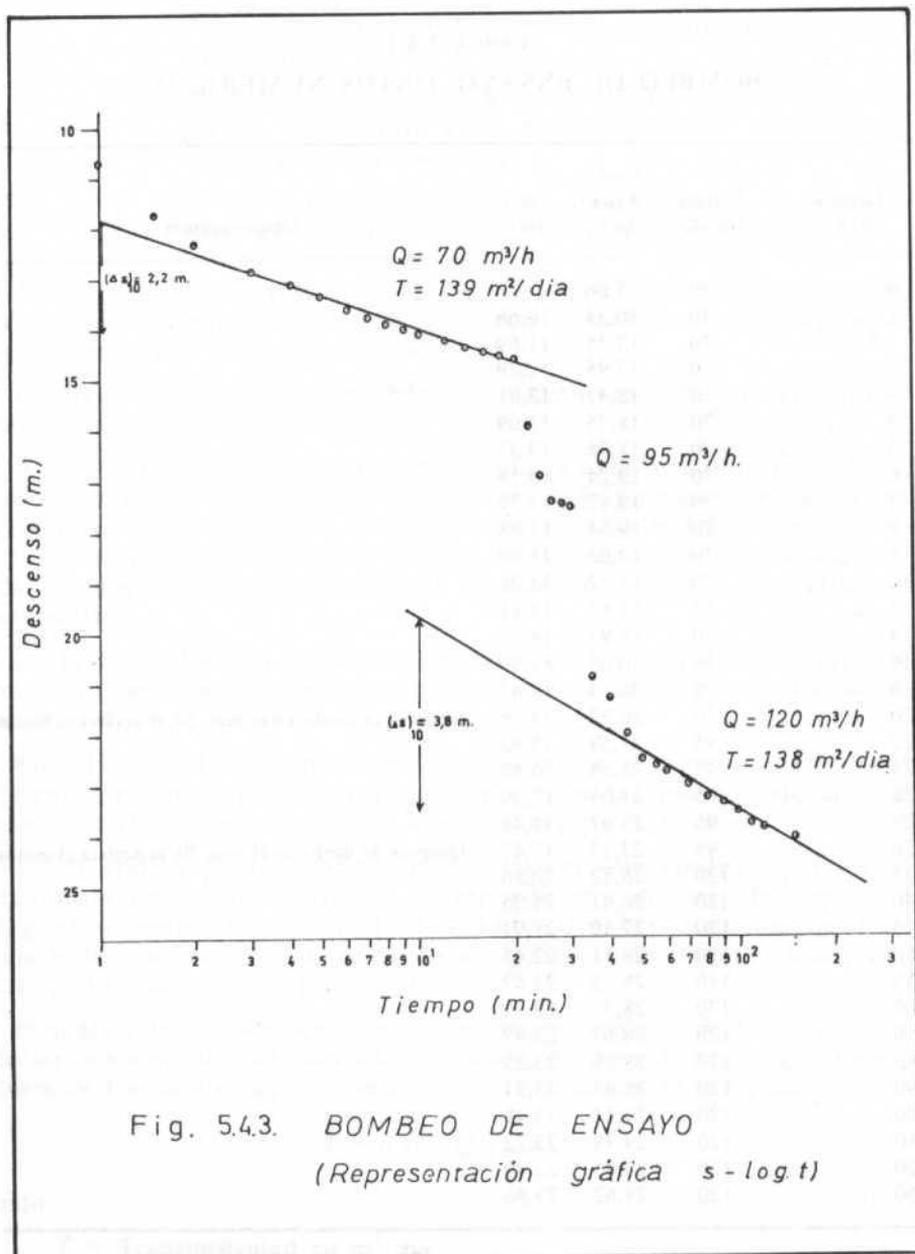


Fig. 5.43. BOMBEO DE ENSAYO
 (Representación gráfica $s - \log t$)

Vemos que en ambas rectas nos sale un valor de la transmisividad equivalente a $140 \text{ m}^2/\text{día}$.

Como puede apreciarse, en los primeros minutos, bombeando a un caudal constante, el acuífero se comporta como cautivo, obteniéndose una recta en el gráfico semilogarítmico. Si se mantiene el caudal constante el descenso tiende a estabilizarse, lo que indica que se trata de un acuífero semiconfinado, ya que en el momento de la estabilización las capas confinantes semipermeables ceden al acuífero un caudal igual al de bombeo.

La interpretación correcta de un ensayo de bombeo en este tipo de acuíferos sería mejor realizarla por otros métodos (Hantush), pero las dificultades anteriormente descritas en la realización de las medidas no permiten tomar datos de suficiente calidad como para que este tipo de interpretaciones resulten efectivas. No obstante creemos que esta interpretación realizada mediante el método de Jacob es indicativa del valor de la transmisividad, aunque en este caso estemos lejos de las condiciones de base impuestas por el «modelo» concebido por Jacob para la deducción de su fórmula, sobre todo en lo referente a la extensión lateral del acuífero y también en lo referente al carácter incompleto del pozo de bombeo. Otras limitaciones vienen dadas por la heterogeneidad relativa del terreno acuífero en un mismo horizonte, limitaciones de carácter secundario frente a las dos anteriores.

5.4.3.4. Distribución espacial de la transmisividad

Al no disponer de suficientes datos de transmisividades, deducidas mediante ensayos de bombeo, nos resulta imposible hacer un mapa de iso-transmisividades, con el fin de ver su distribución por toda la zona.

No obstante, tal como señalábamos en el subapartado 5.3.2., se puede pensar en una distribución espacial de transmisividades aproximadamente equivalente a la de caudales específicos, teniendo siempre presente la complejidad estratigráfica de estos materiales terciarios.

Los valores de transmisividades correspondientes a la zona con un caudal específico superior a $4 \text{ m}^3/\text{h}\times\text{m}$ (véase Figura 5.4.1.) van a ser de $150 \text{ m}^2/\text{día}$ aproximadamente, mientras que las zonas con un caudal específico inferior a $2 \text{ m}^3/\text{h}\times\text{m}$ van a tener una transmisividad que oscilará, de forma aproximada, entre 10 y $40 \text{ m}^2/\text{día}$, estando el valor de transmisividad en el resto de la zona comprendido entre los dos valores anteriores.

5.4.4. Otros parámetros hidráulicos

Además de los parámetros que hemos estudiado a lo largo del presente apartado existen otros parámetros hidráulicos, asimismo indicativos de las características del acuífero, como son: el coeficiente de almacenamiento, la permeabilidad, el factor de goteo, etc.

Las dificultades expuestas anteriormente para poder realizar un bombeo de ensayo correctamente nos han impedido hacer un cálculo de los parámetros indicados anteriormente.

De manera aproximada pensamos que el valor del coeficiente de almacenamiento en este tipo de acuíferos semiconfinados será del orden de 10^{-3} .

La permeabilidad debe ser del orden de 3 m/día. No obstante el valor de la permeabilidad pierde importancia al tener valores de transmisividad que son más significativos.

5.5. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRANEA

5.5.1. Introducción

En el presente apartado hacemos un análisis de las principales características físico-químicas del agua subterránea, con el fin de conocer la calidad de estas aguas respecto a su posible utilización con fines agrícolas, industriales, domésticos, etc. Asimismo el estudio de la composición química de las aguas subterráneas nos puede llevar a buscar una relación con los terrenos atravesados durante su circulación.

Con el fin de determinar la temperatura y la conductividad del agua en el campo hemos tomado las muestras, normalmente, de los mismos sondeos que se han utilizado como piezómetros. No ha sucedido lo mismo para la toma de muestras destinadas a hacer los análisis químicos ya que se ha procurado que fueran procedentes de pozos que estuvieran bombeando, con lo cual no se podían utilizar los piezómetros, al no poder bombear la mayoría de ellos.

En primer lugar determinamos la temperatura y la conductividad eléctrica del agua subterránea, y finalmente hacemos una síntesis de sus características químicas.

5.5.2. Temperatura

La temperatura del agua subterránea tiene un gran interés no sólo en cuanto a su posible uso sino también como característica hidrogeoquímica, al ser un factor decisivo en los fenómenos que tienen lugar en el seno del agua: solubilidad de gases y sales, etc.

En la Tabla 5.5.1. presentamos los valores de la temperatura del agua, en $^{\circ}\text{C}$. El número dado a cada punto corresponde a la numeración dada a los piezómetros en el apartado de piezometría (5.2.2.). Los piezómetros que no tienen el correspondiente valor de temperatura y conductividad, es debido a no poder extraer la muestra de agua del sondeo, al tener instalado el equipo de extracción.

Podemos observar que la temperatura del agua oscila en la mayoría de los casos, entre 10 y 13 $^{\circ}\text{C}$, lo que resulta normal, al ser igual o ligeramente superior a la temperatura media anual de la localidad. PULIDO (1978, p. 259) las clasifica como aguas frías.

5.5.3. Conductividad

La conductividad de un agua representa la capacidad para conducir la electricidad. La medida de la conductividad de un agua da idea del mayor o menor grado de salinización, siendo proporcional al contenido de iones o sales disueltas.

En la Tabla 5.5.1. se pueden ver los valores de las conductividades, expresadas en $\mu\text{mhos/cm}$. correspondientes a los piezómetros descritos en el subapartado anterior. Lógicamente la conductividad varía con la temperatura, con lo cual hemos homogeneizado los valores de conductividad a una temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estos valores de conductividad al igual que los de temperatura se han tomado en el campo durante el mes de Febrero de 1978.

En la Figura 5.5.1. hemos representado un mapa de isoconductividades. No disponemos de mayor número de datos para poder trazar este mapa con mayor precisión, no obstante se puede apreciar que la conductividad va aumentando, en líneas generales, hacia la zona Norte, registrándose aquí los valores más elevados. Como caso excepcional tenemos el valor proporcionado por el piezómetro nº 1, surgente, situado en las proximidades del Duero, con $2258\text{ }\mu\text{mhos/cm}$. Hemos de señalar también que en el NE de la zona, hacia su exterior, existe un área más o menos extensa con unas conductividades elevadísimas debido a la gran salinidad en esta zona de las aguas subterráneas, tal como veremos más adelante.

En estos sectores, tal como dijimos en el apartado de piezometría (5.2.), el flujo es ascendente, lo que nos puede llevar a pensar que esto estaría en relación con aguas que han sufrido un largo recorrido, y como consecuencia de un largo contacto con los sedimentos han sufrido un enriquecimiento en sales.

5.5.4. Calidad química

En la Tabla 5.5.2. se presentan los análisis químicos aniones y cationes más importantes, junto con algunas características físico-químicas de 14 puntos de agua, correspondientes a sondeos profundos, distribuidos por toda la zona y sus proximidades. La toma de muestras para la realización de dichos análisis se realizó en los meses de diciembre de 1978 y enero de 1979.

Hemos utilizado el diagrama de PIPER (en CATALAN, 1969, p. 344) con el fin de presentar gráficamente estos análisis químicos. Se trata de un diagrama triangular en el que representamos aniones y cationes simultáneamente, y un campo central romboidal donde se representa un tercer punto deducido de los que representan los aniones y los cationes. Los cationes representados son Ca^{++} , Mg^{++} , y $\text{Na}^{+}\text{K}^{+}$. Los aniones son SO_4^{-2} , CO_3H^{-} y Cl^{-} , NO_3^{-} . Para su representación los iones están expresados en meq./l (*r*), lo que presenta el inconveniente de perder idea de los valores absolutos, y además dos análisis diferentes pueden dar algún punto coincidente, sin embargo son muy útiles para poder diferenciar distintas zonas. Hemos de señalar que en la Tabla 5.5.2. están expresados los iones en mgr/l.

TABLA 5.5.1.
TEMPERATURAS Y CONDUCTIVIDADES DE LAS AGUAS
SUBTERRANEAS

Número	T _a . (°C)	Conductividad A 25° C (μmhos/cm)
1	13,0	2.258
2	14,4	472
3	13,1	367
4	11,0	426
5	12,0	482
6	11,6	456
10	15,0	446
12	10,8	455
13	11,2	394
15	12,6	410
16	13,0	368
17	12,3	316
22	10,6	438
23	11,1	393
24	10,9	338
25	11,6	362
26	12,2	356
27	10,4	413
29	10,8	340
31	13,0	298
32	10,3	286
33	10,6	186
35	11,8	283
36	10,2	190

En el diagrama de PIPER (5.5.2.) podemos apreciar en el triángulo donde están representados los cationes, que los más abundantes, en general, son los cálcicos, constituyendo una excepción el análisis nº 5 fundamentalmente sódico.

En el triángulo de los aniones observamos que la mayoría son de tipo bicarbonatado, a excepción nuevamente del análisis nº 5 fundamentalmente de iones cloruro. Asimismo este análisis es el único que presenta $\text{CO}_3^{=}$, al ser su pH = 8,9 ya que únicamente se puede presentar $\text{CO}_3^{=}$ a un pH 8,35 (CUSTODIO, 1965, p. 18).

En el componente romboidal del diagrama, donde se representa un punto característico del catión y del anión respectivo, tenemos pues que las aguas van a ser fundamentalmente bicarbonatadas cálcicas y calco-magnésicas. La única

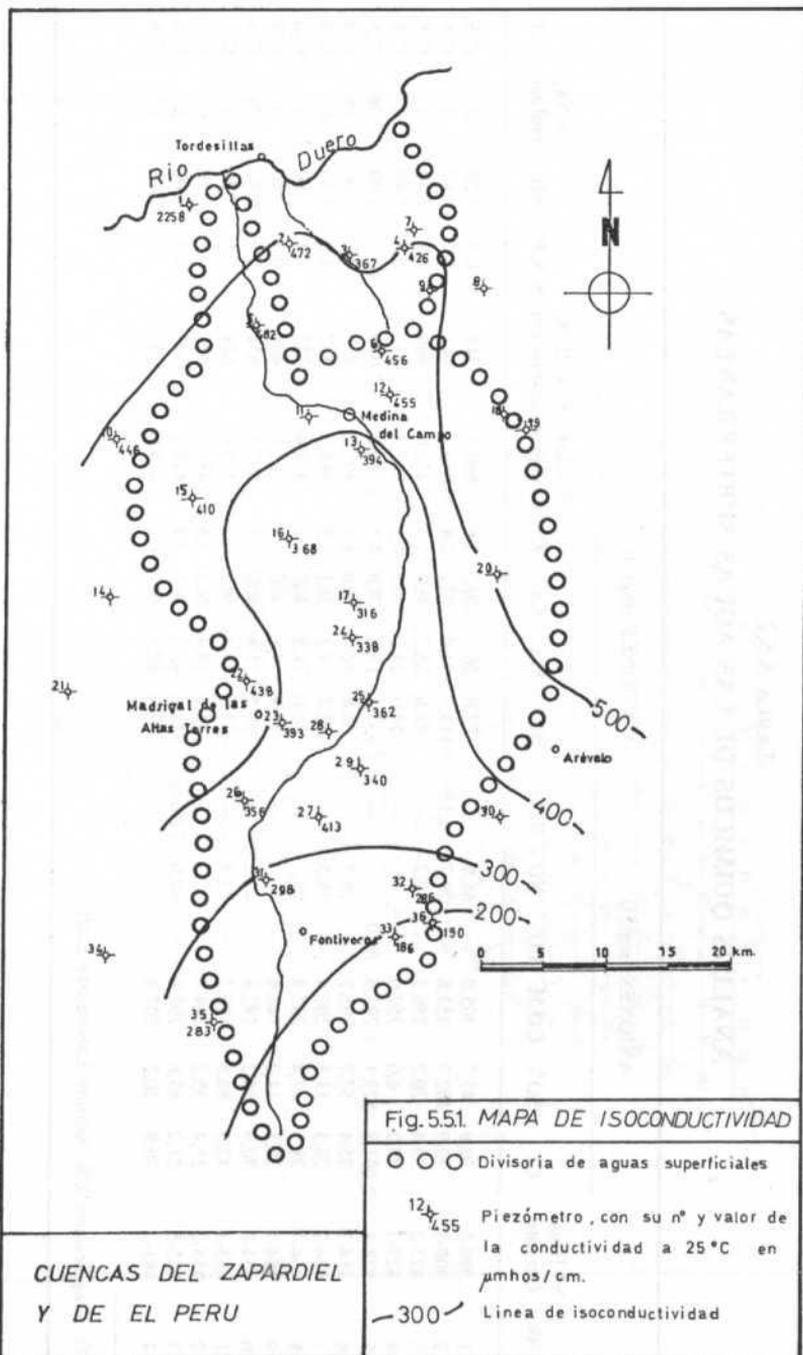


TABLA 5.5.2.
ANÁLISIS QUÍMICOS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Nº	Nº Hoja- Octante	ANIONES (mgr/l)							CATIONES (mgr/l)					Sólidos disueltos	C a 25 °C µmos/cm	S.A.R.	pH	Co ₃ Na ₂ residual	(1)
		Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	CO ₃ H ⁻	CO ₃ ⁻²	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	K ⁺								
1	399-5	70,9	47,7	305,0	—	66,6	—	22,0	26,7	120,2	1,6	660,7	749	0,4	7,20	0	C ₂ S ₁		
2	400-1	70,9	182,7	353,8	—	29,7	0,15	113,5	34,0	72,1	2,4	859,2	848	2,7	7,80	0	C ₃ S ₁		
3	427-2	35,4	20,2	256,2	—	12,2	—	32,0	26,7	48,0	1,3	432,0	460	0,9	7,40	0	C ₂ S ₁		
4	427-3	28,0	6,0	357,0	—	—	—	24,0	24,0	80,0	4,3	523,3	632	0,6	7,40	0	C ₂ S ₁		
5	428-1	2,091,8	523,1	1,293,5	66,0	—	—	1,937,2	19,4	28,0	4,3	6,110,0	7,010	68,7	8,90	7,06	C ₄ S ₄		
6	454-3	35,4	57,7	195,2	—	16,9	—	66,8	12,1	40,0	1,1	495,2	435	2,3	7,60	1,06	C ₂ S ₁		
7	454-7	28,3	11,5	207,4	—	18,5	—	32,0	9,7	56,1	1,5	365,0	447	1,0	7,50	0	C ₂ S ₁		
8	454-7	28,3	47,4	207,4	—	29,7	—	36,0	21,8	40,0	1,8	412,4	732	1,1	7,80	0	C ₂ S ₁		
9	454-7	28,3	14,0	146,4	—	—	—	23,8	4,8	40,0	7,7	265,0	401	0,9	7,40	0	C ₂ S ₁		
10	454-8	70,9	35,2	292,8	—	42,2	—	93,5	21,8	40,0	1,1	597,5	654	2,9	7,80	1,26	C ₂ S ₁		
11	455-1	42,5	85,8	195,2	—	73,4	—	28,0	36,4	68,1	6,2	535,6	624	0,6	7,20	0	C ₂ S ₁		
12	455-2	35,4	35,2	244,0	—	42,2	—	34,0	19,4	68,1	3,6	481,9	624	0,9	7,30	0	C ₂ S ₁		
13	455-5	21,2	85,8	292,8	—	80,0	Trazas	14,6	41,3	80,1	3,4	619,2	593	0,3	7,60	0	C ₂ S ₁		
14	481-7	70,9	20,2	207,4	—	—	—	37,4	12,1	60,1	6,2	414,3	597	1,1	7,40	0	C S		

(1): Clasificación U.S. Salinity Laboratory Staff

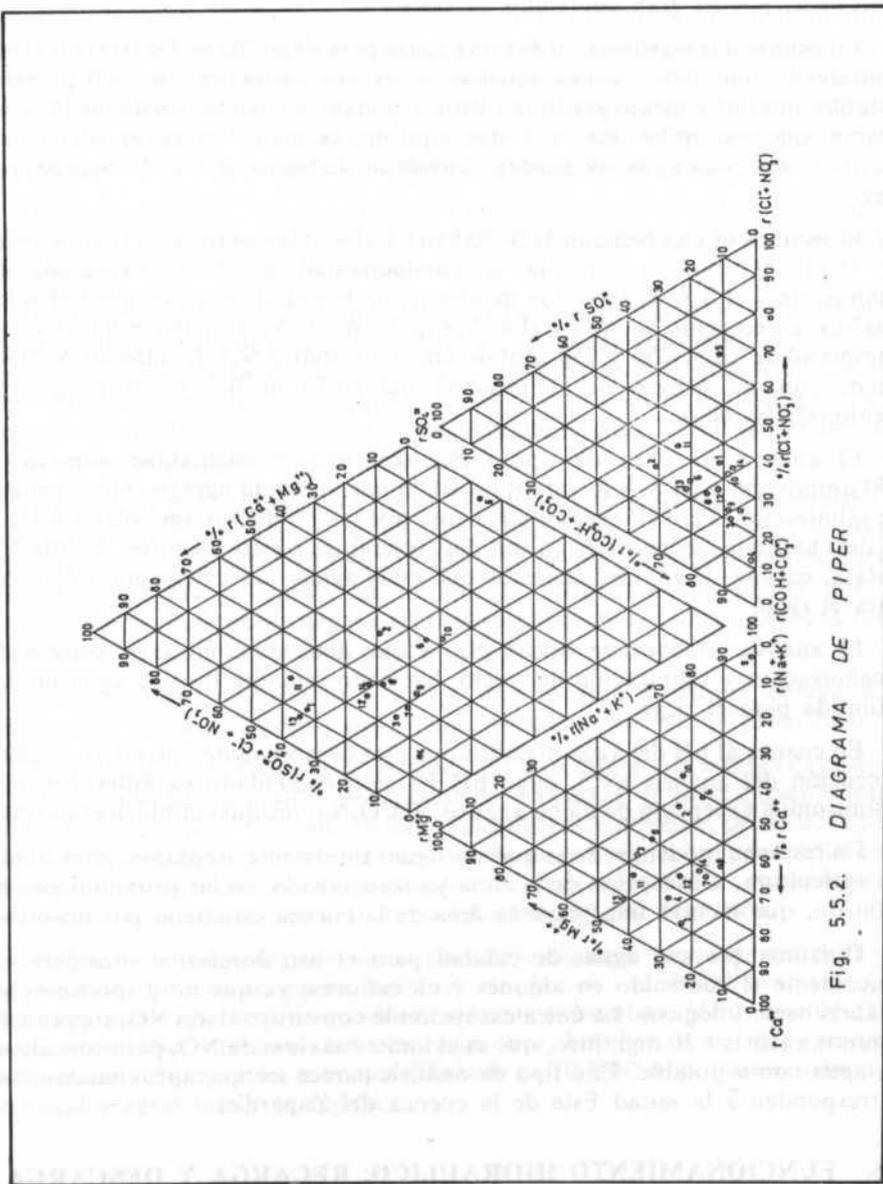


Fig. 5.5.2. DIAGRAMA DE PIPER

excepción la constituye el análisis nº 5 que es clorurada sódica. Este análisis corresponde a la zona descrita en el subapartado anterior, situada hacia el NE de la zona de estudio, donde el agua es inservible para el riego, en la mayoría de las ocasiones, por su gran contenido en sales.

En cuanto a la clasificación de estas aguas para riego, BABE DELGADO (1968) considera como muy buenas aquellas aguas que contienen un total de sales solubles inferior a medio grado por litro, y buenas las que tienen de medio a un gramo, que son ambos los casos que aquí nos ocupan. Por tanto, según esta clasificación, estas aguas se pueden considerar de buenas a muy buenas para el riego.

Si usamos la clasificación U.S. Salinity Laboratory Staff (CUSTODIO, 1976, p. 1890), teniendo en cuenta la conductividad a 25 °C expresada en $\mu\text{mhos/cm}$ y el S.A.R. (relación de absorción de sodio), tenemos que todos los análisis, a excepción del nº 2 y el nº 5, son de tipo C_2S_1 , con una conductividad comprendida entre 250 y 750 $\mu\text{mhos/cm}$. y un índice S.A.R. inferior a 10, es decir, con un peligro de salinización del suelo medio, y un peligro de alcalinización bajo.

El análisis nº 2 es de tipo C_3S_1 , con una conductividad superior a 750 $\mu\text{mhos/cm}$ y un S.A.R. inferior a 10, lo que aumenta ligeramente el peligro de salinización. Pero si tenemos en cuenta que los productos agrícolas a los que se destinan estas aguas de riego son muy tolerantes a estos factores: remolacha, patata, cebada, trigo, etc., tenemos que estas aguas son totalmente tolerables para el riego.

El análisis nº 5 es de tipo C_4S_4 lo que determina un gran peligro de alcalinización y salinización del suelo, haciendo que este tipo de agua no sea admitida para el riego.

En cuanto al pH del agua digamos que está comprendido entre 7,20 y 7,80 a excepción del análisis nº 5, cuyo pH ha sido comentado ya anteriormente. Asimismo, a excepción de dicho análisis, el CO_3Na_2 residual también es normal.

En resumen, podemos decir que son aguas totalmente aceptables para su uso en agricultura, a excepción de la zona ya mencionada, en las proximidades de Olmedo, que incluye una pequeña área de la cuenca estudiada por nosotros.

Digamos que son aguas de calidad para el uso doméstico considerando únicamente el contenido en aniones y en cationes, ya que no disponemos de análisis bacteriológicos. La única excepción la constituye el ión NO_3 superior en algunos análisis a 30 mgr/litro, que es el límite máximo de NO_3 para considerar un agua como potable. Este tipo de análisis parece ser que aproximadamente corresponden a la mitad Este de la cuenca del Zapardiel.

5.6. FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO: RECARGA Y DESCARGA

Como ya hemos visto, estos materiales terciarios profundos constituyen un acuífero complejo formado por multitud de capas lenticulares de gravas y arenas

semiconfinadas por acuitardos, jugando un papel fundamental el agua almacenada en la capa semiconfinante.

Asimismo, de los apartados considerados anteriormente en el presente capítulo de hidrogeología, podemos deducir la existencia de un flujo subterráneo desde el borde Sur de la Cuenca hacia el río Duero, con una componente vertical descendente en la zona Sur y ascendente en la zona Norte. En general este flujo subterráneo regional se adapta a la red superficial de drenaje a excepción de la parte central de la Cuenca, donde va a estar ligeramente modificado debido a la mayor explotación existente en dicha zona.

En la zona Norte vamos a encontrar las aguas de peor calidad química, con un mayor contenido en sales, lo cual es lógico ya que han estado durante mayor tiempo en contacto con los sedimentos.

La recarga en los acuíferos procede, en su gran mayoría, de la infiltración del agua de lluvia caída directamente sobre la Cuenca. Lógicamente, al margen de que la litología sea favorable a la posible infiltración del agua de lluvia, esta recarga se va a producir en aquellas zonas donde la superficie topográfica no corte a la superficie piezométrica, lo cual sucede siempre, como ya hemos visto, excepto en pequeñas áreas de surgencia.

La recarga por infiltración va a ser importante, debido a que la mayoría de los materiales existentes en la Cuenca, en superficie, son arenas y arenas arcillosas con una permeabilidad media que permite una tasa de infiltración considerable. En los meses de verano la infiltración producida por los excedentes de riego puede llegar a ser considerable, sobre todo en aquellas zonas donde existe una mayor explotación de aguas subterráneas.

Asimismo es probable que exista una recarga adicional debida a la infiltración de la escorrentía superficial procedente del borde paleozoico.

La evaluación de todos estos factores que dan origen a la recarga del sistema acuífero, con una precisión medianamente aceptable, es prácticamente imposible. No obstante, y tal como hemos indicado anteriormente, pensamos que la infiltración producida a partir del agua de lluvia es el elemento primordial en la recarga de estos acuíferos. Tal como dijimos en el apartado 3.3. consideramos unas aportaciones debidas a la lluvia eficaz de 80-100 Hm³/año.

En cuanto a la descarga del sistema acuífero digamos que al margen de la que se produce subterráneamente hacia el río Duero, de difícil evaluación, la descarga más importante se produce mediante el bombeo, factor éste de difícil evaluación. No obstante esta descarga por bombeo, con una precisión medianamente aceptable, la hemos estimado en 70 Hm³/año, para satisfacer las demandas agrícolas de la región.

CONCLUSIONES

HIDROGEOMETRIA

- Se establecen los parámetros y gráficos representativos de la morfología de la Cuenca. El 90 % de su superficie está comprendida entre 700 y 900 metros de altitud, siendo su altura media de 780 metros.

HIDROMETEOROLOGIA Y BALANCE HIDRICO

- El aumento normal de la precipitación con la altitud solamente se produce por encima de los 800 metros. Por debajo de dicha cota no sólo no decrece, sino que aumenta ligeramente.
- La precipitación media anual es del orden de 400 mm., existiendo una gran uniformidad en la distribución geográfica de la misma. Esta pluviometría equivale a un volumen de agua de 600 a 700 Hm³/año.
- La temperatura media anual de la zona oscila entre 11 y 12 °C, con ligeras variaciones al S y al N de la misma.
- De estas características climatológicas deducimos que los procesos morfogenéticos de mayor importancia se producen al comienzo y al final de la época árida del año.
- La ETP media anual es de 700 mm., aumentando ligeramente de S a N.

- La *ETR* media anual es aproximadamente de 350 mm., con ligeras variaciones por exceso al N y al S. Esto equivale a un volumen de 500 a 600 Hm³/año, lo que supone unas pérdidas por evapotranspiración del 80-90 % de las precipitaciones.
- La lluvia eficaz media anual oscila entre 50 y 60 mm., equivalentes a un volumen de agua aprovechable de 80 a 100 Hm³/año.
- Debido al escaso relieve y a las características geológicas de la Cuenca, solamente una mínima parte de este volumen de agua constituye escorrentía superficial.

HIDROGEOLOGIA

- Los materiales terciarios profundos constituyen un acuífero de gran complejidad geológica e hidrodinámica. Este acuífero está formado por multitud de capas lenticulares de gravas y arenas semiconfinadas por acuitardos, con un grado variable de interconexión hidráulica y dotadas cada una de ellas de características hidráulicas propias, jugando un papel fundamental el agua almacenada en la capa semiconfinante.
- Se dan una serie de consideraciones prácticas respecto a las características constructivas de las obras de captación.
- La superficie piezométrica sigue en líneas generales la configuración topográfica, existiendo un gradiente hidráulico que pone de manifiesto un flujo subterráneo desde el borde Sur de la Cuenca hasta el río Duero.
- Los niveles piezométricos varían cíclicamente, alcanzando un nivel máximo en los meses de Abril-Mayo y un valor mínimo en los meses de Septiembre-Octubre. Esta oscilación es superior a los 20 metros en las zonas de mayor explotación.
- En general parece existir una tendencia interanual al descenso de los niveles piezométricos, debido a la sobreexplotación que, del acuífero, se produce en algunas zonas. Entre otros aspectos negativos, el más evidente es la desaparición de acuíferos superficiales de gran importancia hasta hace unos años.
- Se presenta un mapa de caudales específicos, a escala 1:200.000. Los caudales específicos oscilan aproximadamente entre 0,5 y 6 m³/h×m., estando la mayoría de ellos comprendidos entre 2 y 4 m³/h×m.

- Se establece una relación entre la transmisividad y el caudal específico, mediante la ecuación $T \text{ (m}^2/\text{día)} = 25 Q.e. \text{ (m}^3/\text{h}\times\text{m)}$.
- Se trata de aguas poco salinas, bicarbonatadas cálcicas. El contenido en sales oscila, en la mayoría de los casos, entre 300 y 600 mgr/l., con un ligero aumento de Sur a Norte, debido a la mayor permanencia de las aguas en contacto con los sedimentos.
- En el límite NE existe un pequeño área, que alcanza su máximo desarrollo hacia fuera de nuestra zona de estudio, en la que aparecen aguas muy salinas —varios miles de mgr/l— cloruradas sódicas.
- De las características químicas de las aguas subterráneas deducimos que son perfectamente aptas para riego y consumo, a excepción de la zona situada al NE anteriormente mencionada.

.....

RECURSOS HIDRAULICOS E INTERES HIDROECONOMICO DEL PRESENTE ESTUDIO

A continuación vamos a extraer las conclusiones prácticas que se deducen del presente trabajo, por considerarlas de sumo interés, a fin de lograr una mejor explotación de los recursos hidráulicos en la región:

- Las aportaciones superficiales son escasas e irregularmente distribuidas. La topografía y la geología de la zona no permiten ningún tipo de regulación de estos recursos superficiales, de modo que son totalmente insuficientes para satisfacer las demandas de la región.
- Así pues, la explotación subterránea es el único recurso hidráulico con el que cuenta la región para abastecer sus demandas, fundamentalmente agrícolas y urbanas.
- Estimamos que las Has. en regadío existentes en la zona son del orden de 20.000 (IGME-INIFIG, comunicación personal), estando prácticamente la totalidad abastecidas con agua subterránea. Esta demanda agrícola, suponiendo un bombeo neto de 3.500 Hm³/H.a. × año, representa un total de 70 Hm³/año. Tenemos que tener asimismo en cuenta que, además de este consumo agrícola, las demandas urbanas e industriales se satisfacen igualmente con agua subterránea.

- Si tenemos en cuenta que las aportaciones procedentes de la lluvia eficaz las hemos estimado en 80-100 Hm³/año, hemos de suponer que las otras salidas del sistema (aportación superficial del río, escorrentía subterránea hacia el Duero...) son importantes, pues es un hecho evidente la tendencia interanual al descenso de los niveles piezométricos, sobre todo en las zonas de mayor explotación. Esto está constatado por la observación experimental que hemos realizado a lo largo de dos años de medidas periódicas y sistemáticas de la evolución de los niveles piezométricos de la región.
- Es pues evidente que existe una sobreexplotación de los recursos subterráneos a costa de las reservas de agua existentes.
- Esta sobreexplotación tiene una gran importancia en el futuro económico de la región. Debería de tomarse conciencia de la gravedad del hecho y, en base a un mejor conocimiento científico del problema, adoptar las medidas pertinentes a fin de evitar, entre otras cosas, la pérdida de 20.000 Has. de regadío y con ello la base de la economía regional.

Recordemos, para evaluar económicamente estos recursos, que el Plan Almonte-Marismas, en el Guadalquivir, o sin ir más lejos el de la Armuña, en Salamanca, representarán la transformación de unas 20.000 Has. el primero y unas 28.000 el segundo, éste con aguas superficiales, y que estos planes suponen un coste de miles de millones de pesetas cada uno. Este es pues el valor que tienen los acuíferos de esta región actualmente.

- La primera medida a tomar en tal sentido sería la de evitar, mediante los resortes legales pertinentes, la actual explotación anárquica de los recursos y reservas de la región, y comenzar de inmediato una labor de control periódico y sistemático de los caudales subterráneos explotados y de las oscilaciones de los niveles piezométricos, tal y como hemos realizado en el presente trabajo.

Los resultados de una labor de investigación así programada permitirán en un futuro muy próximo poder conocer con mayor precisión que la actual, el funcionamiento hidráulico del sistema hidrogeológico regional y, en consecuencia, trazar un plan racional de control y protección de esta importante riqueza que está en vías de irreparable destrucción.

BIBLIOGRAFIA

- AERO SERVICE, LTED. (1967): *Mapa Geológico de la Cuenca del Duero. Escala 1:250.000*. Inst. Nac. Coloniz. e Inst. Geol. Min. de España.
- BABE DELGADO, E. (1968): *Química de las aguas subterráneas*. Estudios, vol. VI. Publ. del Inst. Nac. Coloniz. Madrid, p. 46.
- CAPOTE, R. (1971): *Estudio geoestructural de los afloramientos metamórficos del Norte de la provincia de Avila*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- CAPOTE, R. y FERNANDEZ CASALS, M.J. (1971): *Esquistosidad y tectónica superpuesta en el Paleozoico Inferior del afloramiento metamórfico de Muñico (Provincia de Avila)*. Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Geol.), T 69, nº 2, pp. 175-185.
- CAPOTE, R. y VEGAS, R. (1968): *El Paleozoico de los alrededores de Avila*. Est. Geol. vol. XXIV, pp. 181-189.
- CASTANY, G. (1963): *Traité pratique des eaux souterraines*. Ed. Dunod, París, p. 658.
- CATALAN, J. (1969): *Química del agua*. Ed. Blume, p. 355.
- CORRALES, I.; CARBALLEIRA, J.; CORROCHANO, A.; POL, C.; ARMENTEROS, I. (1978): *Las facies miocenas del Sector Sur de la Cuenca del Duero*. Publ. del Dpto. de Estratigrafía, nº 9. Universidad de Salamanca.
- CORRALES, I.; ROSELL, J.; SANCHEZ DE LA TORRE, L.; VERA, J.A.; VILAS, L. (1977): *Estratigrafía*. Ed. Rueda, Madrid, p. 718.
- CORROCHANO, A. (1977): *Estratigrafía y Sedimentología del Paleógeno en la provincia de Zamora*. Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca.
- CRUSAFONT, M.; AGUIRRE, E. y GARCIA, J. (1968): *Un nuevo yacimiento de mamíferos del Mioceno de la Meseta española*. Acta Geol. Hispánica, T. III, pp. 22-24.
- CRUSAFONT, M. y TRUYOLS, J. (1960 a): *Sobre la caracterización del Vallesense*. Not. y Com. Inst. Geol. Min. de España, nº 60, pp. 109-126.
- (1960 b): *El Mioceno de las Cuencas de Castilla y de la Cordillera Ibérica*. Not. y Com. Inst. Geol. Min. de España, nº 60, pp. 127-140.
- CRUSAFONT, M. y VILLALTA, J.F. (1954): *Ensayo de síntesis sobre el Mioceno de la Meseta Castellana*. R. Soc. Esp. Hist. Nat., Tomo Extr. Hom. Hdez. Pacheco, pp. 215-227.

- CUSTODIO, E. (1965): *Notas sobre hidroquímica*. Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental y Servicio Geológico de Obras Públicas. Barcelona, p. 103.
- CUSTODIO, E. y LLAMAS, M.R. (1976): *Hidrología subterránea*. 2 tomos. Ed. Omega, Barcelona, p. 2.360.
- DAVIS, S.N. y DE WIEST, R. (1971): *Hidrogeología*. Ed. Ariel, Barcelona, p. 564.
- DUBREUIL, P. (1974): *Initiation à l'analyse hydrologique*. Ed. Masson Cie., París, p. 216.
- FOURNIER, F. (1960): *Climat et érosión*. Ed. Presses Universitaires de France, p. 201.
- GALOFRE, A. (1966): *Cálculo de la transmisividad a partir de descensos específicos. Estudio de los Recursos Hidráulicos Totales de las Cuencas de los Ríos Besós y Bajo Llobregat*. Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental y Servicio Geológico de Obras Públicas. Barcelona, pp. 7.69-7.73.
- GARCIA, J. y ALBERDI, M.T. (1968): *Nueva tortuga fósil en el Mioceno de Arévalo*. Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Biol.), T 66, pp. 141-149.
- GARCIA ABBAD, F. y REY SALGADO, J. (1973): *Cartografía geológica del Terciario y Cuaternario de Valladolid*. Bol. Geol. Min. T LXXXIV-IV, pp. 213-227.
- GARMENDIA, J. (1972): *El clima de la Provincia de Avila*. Publ. del I.O.A.T.O., Salamanca.
- HERAS, R. (1970): *Métodos prácticos para el estudio hidrológico completo de una cuenca*. Ed. Centro de Estudios Hidrográficos, Madrid.
- (1972): *Manual de Hidrología. T I*. Ed. Centro de Estudios Hidrográficos, Madrid.
- I.G.M.E. (1970): *Mapa Geológico de España. Escala 1:200.000. Síntesis de la cartografía existente. Hoja nº 37 (5A)*. Inst. Geol. Min. de España.
- (1972): *Mapa Geológico de España. Escala 1:200.000. Síntesis de la cartografía existente, Hoja nº 29 (Valladolid)*. Inst. Geol. Min. de España.
- I.N.I.A. (1973): *Estudio agroclimático de la Cuenca del Duero*. Publ. del Ministerio de Agricultura, Madrid.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA: *Boletín mensual climatológico*. Sección de Climatología de la Oficina Central, Madrid.
- Resumen anual de observaciones meteorológicas*. Sección de Climatología de la Oficina Central.
- JIMENEZ, E. (1971): *Nuevos yacimientos de fósiles en Coca (Segovia) y su significado estratigráfico*. Stv. Geol., vol. II, pp. 57-82.
- (1977): *Sipnosis sobre los yacimientos fosilíferos paleógenos de la provincia de Zamora*. Bol. Geol. Min., T LXXXVIII, pp. 357-364.
- LOPEZ VERA, C.F. (1977): *Hidrogeología regional de la Cuenca del río Jarama en los alrededores de Madrid*. Mem. Inst. Geol. Min. de España, T 91, p. 227.
- LLAMAS MADURGA, M.R. y LOPEZ VERA, C.F. (1977): *Incidencia de las características tecnológicas de los pozos en la explotación de los acuíferos del terciario detrítico de Madrid*. Bol. Geol. Min., T LXXXVIII-IV, pp. 316-327.
- MALLADA, L. (1927): *Explicación del mapa geológico de España. T II. Sistemas cambriano y silúrico*. Mem. de la Com. Geol. de España, Madrid.
- MARTIN DONAYRE, F. (1879): *Bosquejo geológico de la provincia de Avila. Escala 1:400.000*. Mem. Inst. Geol. Min. de España.
- M.O.P. (1973 a): *Estudio previo de terrenos. Corredor del Noroeste. Tramo: Medina del Campo-Palencia*. Estudio 73/1, M.O.P.
- (1973 b): *Estudio previo de terrenos. Corredor del Noroeste. Tramo: Salamanca-Medina del Campo*. Estudio 73/2, M.O.P.
- PEGUY, P. (1970): *Précis de Climatologie*. Ed. Masson Cie, París, p. 468.
- POL, C.; CORRALES, I.; CORROCHANO, A. y CARBALLEIRA, J. (1977): *Las facies detríticas del Mioceno del Sector Sur de la Cuenca del Duero*. VIII Congreso Nacional de Sedimentología. Oviedo-León.

- PORRAS MARTIN, J. (1973): *Estudio hidrogeológico de la Cuenca del Duero*. Bol. Geol. Min., T LXXXIV-V, pp. 336-346.
- PRADO, C. DEL (1862): *Reseña geológica de la provincia de Avila y de la parte occidental de la de León*. Mem. Inst. Geol. Min. de España.
- PULIDO CARRILLO, J.L. (1978): *Hidrogeología práctica*. Ed. Urmo, Bilbao, p. 314.
- REMENIERAS, G. (1965): *L'hydrologie de l'ingenieur*. Ed. Collection du Centre de Recherches et d'essais de Chatou. Eyrolles, p. 456.
- (1971): *Tratado de Hidrología aplicada*. Ed. Técnicos Asociados, Barcelona, p. 516.
- ROCHE, M. (1963): *Hydrologie de surface*. Ed. Gauthier-Villars, París, p. 430.
- SALVADOR, G. (1977): *Estudio geológico de la región de Tordesillas*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Salamanca.
- SANCHEZ DE LA TORRE, L. (1972): *Exploración hidrogeológica regional*. Curso de Hidrogeología «Noel Llopis». T IV, tema 12, Madrid.
- SANCHEZ SAN ROMAN, F.J. (1975): *Aproximación al conocimiento hidrológico de la Cuenca del Tormes*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Salamanca.
- SASTRE MERLIN, A. (1976): *Características hidrogeológicas de los materiales detríticos de edad terciaria y cuaternaria de los alrededores de Talavera de la Reina (Toledo)*. Simposio Nac. de Hidrogeología. Publ. del Grupo de Trabajo de Hidrogeología. T I, pp. 376-397. Valencia, 1976.
- VILLARROYA GIL, F.I. y REBOLLO FERREIRO, L.F. (1976): *Contribución al conocimiento hidrogeológico del Mioceno detrítico en la Cuenca del Río Henares*. Simposio Nac. de Hidrogeología. Publ. del Grupo de Trabajo de Hidrogeología. T I, pp. 421-435. Valencia, 1976.
- WILSON, L. (1968): *Morphogenetic classification*. In the Encyclopedia of Geomorfology (R.W. Fairbridge editor), New York, Reinhold, pp. 717-731.

INDICE

RESUMEN	9
1. INTRODUCCION	11
1.1. Interés y objetivos del presente trabajo	11
1.2. Métodos de trabajo	12
2. EL COMPLEJO FISIOGRAFICO DE LA CUENCA	15
2.1. Situación geográfica y generalidades	15
2.2. Hidrogeometría	17
2.2.1. Introducción	17
2.2.2. Método de trabajo	17
2.2.3. Obtención de los datos básicos	18
2.2.4. Parámetros representativos del relieve y de la geometría de la cuenca	18
2.2.4.1. Curva hipsométrica y curva de frecuencias altimétricas	18
2.2.4.2. Altitud media	20
2.2.4.3. Rectángulo equivalente	20
2.2.4.4. Índice de compacidad	21
2.2.4.5. Índice de pendiente	22
2.2.4.6. Coeficiente de masividad	23
2.2.4.7. Coeficiente orográfico	24
2.2.4.8. Pendiente media del río	24
3. ESTUDIO DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA HIDROGEOLOGICO	25
3.1. Hidrometeorología	25
3.1.1. Precipitaciones	25
3.1.1.1. Introducción	25
3.1.1.2. Obtención y elaboración de los datos básicos meteorológicos	25

3.1.1.3.	Consideraciones respecto al período de duración de las series climáticas	27
3.1.1.4.	Presentación de los datos obtenidos	29
3.1.1.5.	Variación de la pluviometría con la altitud	29
3.1.1.6.	Cálculo de la precipitación media y volumen de agua precipitada	33
3.1.1.6.1.	Introducción	33
3.1.1.6.2.	Curvas isoyetas	33
3.1.1.6.3.	Polígonos de Thiessen	33
3.1.2.	Temperaturas	36
3.1.2.1.	Introducción	36
3.1.2.2.	Obtención y elaboración de los datos termométricos	36
3.1.3.	Características climatológicas	37
3.1.3.1.	Consecuencias morfo genéticas	40
3.2.	Evapotranspiración	43
3.2.1.	Introducción	43
3.2.1.1.	Conceptos	43
3.2.1.2.	Métodos de cálculo	44
3.2.2.	Cálculo de la ETP. Fórmula de Thornthwaite	44
3.2.3.	Estimación de ETR a partir de valores de ETP	45
3.2.4.	Cálculo de ETR. Fórmulas de Turc y Coutagne	48
3.2.5.	Elaboración de los datos obtenidos: cálculo de la ETR anual media	52
3.3.	Lluvia eficaz	52
3.3.1.	Introducción	52
3.3.2.	Cálculo de la lluvia eficaz y coeficientes de escorren tía	55
3.3.3.	Distribución de la lluvia eficaz y variación con la altitud	55
3.3.4.	Lluvia eficaz media y volumen de agua aprovechable	55
3.4.	Hidrología superficial	62
3.4.1.	Introducción	62
3.4.2.	Datos de aforos	64
3.5.	Balace hídrico	67
3.5.1.	Introducción	67
3.5.2.	Caudales estimados a partir de las variables hidrometeorológicas	68
3.5.3.	Comparación de estos caudales estimados con los datos de aforos	69
4.	GEOLOGIA	71
4.1.	Introducción	71
4.2.	Paleozoico	72
4.3.	Terciario	72
4.4.	Cuaternario	76
5.	HIDROGEOLOGIA	77
5.1.	Introducción	77
5.1.1.	Objetivos	77
5.1.2.	Características del sistema acuífero	77
5.2.	Piezometría	79
5.2.1.	Introducción	79
5.2.2.	Mapas piezométricos	79
5.2.3.	Evolución de los niveles piezométricos	81
5.2.4.	Zonas de surgencia	84
5.3.	Explotación de los acuíferos	84
5.3.1.	Introducción	84

5.3.2.	Distribución geográfica	88
5.3.3.	Caudales y profundidades	88
5.3.4.	Características de las obras de captación	88
5.3.5.	Consideraciones respecto a las características constructivas de los pozos.....	89
5.4.	Propiedades hidráulicas	90
5.4.1.	Introducción	90
5.4.2.	Caudales específicos.....	90
5.4.2.1.	Introducción	90
5.4.2.2.	Factores que influyen sobre el caudal específico	91
5.4.2.3.	Distribución espacial de los caudales específicos	91
5.4.3.	Transmisividades.....	92
5.4.3.1.	Introducción	92
5.4.3.2.	Estimación de la transmisividad a partir del caudal específico	93
5.4.3.3.	Cálculo de la transmisividad mediante bombeos de ensayo	95
5.4.3.4.	Distribución espacial de la transmisividad	99
5.4.4.	Otros parámetros hidráulicos.....	99
5.5.	Calidad del agua subterránea	100
5.5.1.	Introducción	100
5.5.2.	Temperatura	100
5.5.3.	Conductividad	101
5.5.4.	Calidad química	101
5.6.	Funcionamiento hidráulico: recarga y descarga	106
	CONCLUSIONES	109
	BIBLIOGRAFIA	113

**ESTUDIO
DE LOS MATERIALES ARCILLOSOS
EN EL NORDESTE
DE LA PROVINCIA DE SALAMANCA
PARA SU UTILIZACION INDUSTRIAL**

VICENTE POLO DIEZ DE SOLIS

ESTUDIO
DE LOS MATERIALES ARQUITECTONICOS
EN EL NOROESTE
DE LA PROVINCIA DE SALAMANCA
PARA SU UTILIZACION INDUSTRIAL

Trabajo de investigación que presenta
D. VICENTE POLO DIEZ DE SOLIS,
Dr. en Ciencias Químicas y Profesor
Numerario de Física y Química, en
el Instituto de Formación Profesional
«Rodríguez Fabres» de Salamanca.

INTRODUCCION

La idea de poder preparar de una manera más completa, a los alumnos que siguen sus estudios en la Rama de Química, especialidad: OPERADOR DE LABORATORIO, en el INSTITUTO de FORMACION PROFESIONAL «RODRIGUEZ FABRES» de SALAMANCA, me llevó a preparar un amplio programa de trabajos de investigación, que se pudieran realizar en nuestros laboratorios, con la colaboración de los alumnos, y que asimismo tuvieran una proyección fuera de las aulas y dentro de nuestra provincia.

Dicho programa consta de las siguientes partes:

1. Estudios de los materiales arcillosos en el Nordeste de la Provincia de SALAMANCA, para utilización industrial.
2. Estudio de materiales silíceos, aptos para la fabricación de vidrio y sus derivados.
3. Estudio sobre aprovechamiento de los sedimentos terciarios y cuaternarios, como material base para su empleo en Obras Públicas y Viviendas.
4. Estudio de la presencia de FOSFORO en los suelos y su influencia sobre las plantas.
5. Estudio de los yacimientos calizos en las Sierras de FRANCIA y de BEJAR (Salamanca).

Ya se ha realizado el primero de los trabajos citados anteriormente, espero poder realizar la totalidad de los mismos en un plazo máximo de cinco años.

El presente estudio tiene un doble objeto, el primero es aportar nuevos datos para la localización y posterior explotación de materiales arcillosos, que sirvan de materias primas para su empleo en la industria cerámica y permita la fabricación de piezas especiales; el segundo, es el iniciar a los alumnos en las

tareas propias que precisa un trabajo de investigación, tanto las realizadas en el campo, como en el laboratorio.

No hace falta enumerar las dificultades que esto ha traído consigo, pues la escasez de medios adecuados, ha hecho que su realización se dilatara más tiempo del previsto. Los desplazamientos para la toma de muestras, se realizaron en mi vehículo, y los ensayos, en el laboratorio del INSTITUTO DE FORMACION PROFESIONAL «RODRIGUEZ FABRES», con lo que la colaboración de los alumnos de Primero de F.P-1 de la Rama QUIMICA, que fueron los realizadores materiales, adquiriendo con ello una práctica importante y un aumento de su formación técnica.

Pero sin duda el aspecto más positivo, ha sido la inquietud que se ha creado en ellos, que ávidos de conocimientos, ven de forma real, como una simple toma de muestras, requiere unos conocimientos previos, para su selección y ejecución, y que los métodos de análisis empleados, han sido objeto de una puesta a punto con anterioridad, para que su aplicación sea más fácil.

CAPITULO I

LA INVESTIGACION COMO UNA RAMA DE LA CIENCIA

Entre los diversos objetivos que se pueden considerar en la enseñanza como principales, debe figurar el dedicado al desarrollo de la investigación en todos los estudios de Grado Medio.

No hay duda de que los alumnos de nuestros Institutos de Formación Profesional, cuando acuden a los mismos, ya tienen en parte decidido su aspecto profesional, a partir de este momento su preparación científica y tecnológica, no admite pausas ni demoras, nosotros como responsables de su formación integral no debemos regatear esfuerzos, dentro de nuestras posibilidades.

El alumno que ya ha sido capaz de elegir una profesión de cara al futuro, debe procurar sentirse satisfecho, pues creo que ha dado un primer paso, como es el pensar y discurrir por sí sólo lo que desea, y la meta propuesta se conseguirá, cuando los conocimientos adquiridos por ellos mismos alcancen niveles competitivos.

La evolución constante a la que nos vemos todos sometidos en la vida actual, no permite hacer planes no ya a largo plazo, sino a plazo medio, debemos ser prácticos y realistas y aprovechar a fondo los recursos y elementos presentes.

Necesitamos contrastar ideas con experimentos, reconociendo causa con efecto, y llegar a una correlación entre los conocimientos ya adquiridos.

El profesor puede hacer experiencias delante de sus alumnos y explicar las condiciones para la realización del experimento, pero no basta con esto, es preciso explicarle los diferentes motivos y causas por las que se guían. Es entonces cuando el alumno despierta de su impasibilidad y comienza a hacerse infinidad de preguntas, asimismo, algunas obtendrán respuesta inmediata y otras por el contrario le obligarán a buscar una interpretación consultando libros, contrastando pareceres con otros compañeros, todo, hasta dar una solución.

El «germen» se ha creado ahora, al investigador incipiente hay que guiarle, hay que cuidarle, mimarle, hay que hacer lo imposible para que no se malogre.

Por eso los trabajos de investigación no deben realizarse de una manera individual, sino más bien en grupos, de forma que exista una cierta atmósfera de inquietud e interés por lo que se va a realizar. Los alumnos llevados por esa curiosidad innata natural, establecen los primeros contactos personales con la ciencia. Llegarán después a reconocer el que sus estudios precisan de un modo particular la solución de los problemas, y que un espíritu científico, implica un análisis exhaustivo y desapasionado de datos auténticos, que permitan la elaboración de unas conclusiones que sirvan de base para la consecución de otras.

Para los alumnos, el entrenamiento que la Ciencia les confiere, definiendo problemas, seleccionando datos, formulando hipótesis que justifiquen después su validez, supone la adquisición de un hábito de estudio muy útil, que puede hacerse extensivo a algunos de los problemas que se han de encontrar luego en la vida real.

Cuando estas experiencias han sido realizadas por los alumnos de manera satisfactoria, observamos como su capacidad de iniciativa ha aumentado considerablemente, llegando incluso a plantear una nueva idea con solución y conclusiones propias.

Su curiosidad empieza a estar satisfecha, se estimula y crece, pues se han acostumbrado a leer y pensar en actitud científica.

Es indudable, que la Ciencia ha contribuido en gran medida al logro de lo que hoy es nuestra vida moderna. El desarrollo actual se basa en la existencia de métodos científicos cuya finalidad no es otra que llegar a comprobar experimentalmente aquello que se ha planificado de antemano, después de un amplio y exhaustivo estudio.

La enseñanza de las Ciencias, es más que una hábil exposición de hechos, teorías y planteamientos, es más bien una forma de adquirir conocimientos en lo primordial.

Planteemos el problema tal como lo hizo ANMSTRONG hace medio siglo, sustituyendo el dicho «aquí tenemos algo que aprender» por el de «aquí tenemos algo que resolver».

Los alumnos, está comprobado, se interesan más por las cosas que les rodean y sobre todo por todo aquello que experimentan.

Cada alumno debe vivir su ciencia, es decir, ser elemento activo, realizando sus experimentos, mejor que de manera pasiva recibir una explicación, de esta forma se comprenderá la importancia que las vivencias de carácter personal tendrán para toda su vida.

Pero hay un aspecto que no se debe olvidar, la Ciencia debe tener una proyección social, el complemento final de todo lo realizado, necesita la

colaboración de las Empresas, a donde irán a parar la mayor parte de nuestros alumnos más cualificados.

1. METODO CIENTIFICO

Una vez trazados los objetivos apropiados y elaborados los planes de trabajo, es necesario que exista una correlación entre ellos y esta conexión es precisamente el denominado METODO CIENTIFICO, garantizando de esta forma el éxito del mismo.

Un METODO CIENTIFICO lo podemos encuadrar en las siguientes fases:

A) Una introducción para llamar la atención del alumno y dirigirla hacia los objetos y fenómenos que él ha experimentado propiamente.

B) Hacer una recopilación sobre hechos conocidos, que se estén estudiando.

C) Realización de experimentos que necesiten una mayor atención y precisen de una menor crítica en sus comentarios.

D) Llegar a establecer fórmulas, dar definiciones, sacar conclusiones e incluso el enunciado de leyes.

E) Hacer aplicación a problemas experimentales de cada día.

Se ha considerado hasta ahora el METODO CIENTIFICO, como el normal, pero sin embargo aceptamos que en otras circunstancias y con su debida razón, se puede uno apartar del mismo siguiendo otros métodos.

Así por ejemplo, el Método heurístico, es útil siempre que se realice con ayuda y tutela del Profesor, pero no se puede pensar en que el alumno vaya a redescubrir por sus propios medios una conclusión útil, a la que se podría llegar con un coloquio entre Profesor y alumno.

El Método histórico, es útil en cuanto que, se proyecta un programa comenzando por lo más sencillo y terminando por lo más complejo, así por ejemplo, se puede estudiar el agua y el aire, antes que sus componentes, pero sin llegar a un rigor histórico demasiado amplio, puesto que los alumnos se perderían en los detalles, apartando su atención del tema, pero hemos de aceptar, que el estudiar como han trabajado otras gentes, no evita el que hemos de realizar el trabajo por nosotros mismos.

2. OBJETIVOS DE LA CIENCIA

Las Ciencias buscan el conocimiento y comprensión de todos en general y de la vida misma en particular, siguiendo un método que consiste esencialmente en observar y clasificar atentamente los fenómenos, en experimentar y en formular las denominadas leyes que reúnen nuestros conocimientos a conjuntos de hechos observados.

La aceptación de estas leyes dependerá de la comprobación de todos los resultados observados, estando continuamente sujetas a revisión y subsiguientes comprobaciones con nuevos experimentos, que aceptados como válidos, pueden conducir a futuros descubrimientos.

La Ciencia exige un criterio libre, y una capacidad de resolución suficiente, para poder juzgar objetivamente los hechos. El hombre de ciencia debe ser evidente, sin prejuicios personales sobre los hechos revelados por cualquier observación y todos sus experimentos han de estar científicamente bien preparados.

Es evidente que los estudios científicos nos han de mostrar como pueden ser aprovechados los recursos que se encuentran en la Naturaleza en beneficio de la humanidad, y que estén al servicio del hombre. Es decir, que los diferentes descubrimientos logrados y que han sido puestos libre e incondicionalmente a disposición del hombre, exige a toda la humanidad un reconocimiento de la deuda contraída a favor de toda la Ciencia.

3. IMPORTANCIA DE LA ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS

La enseñanza de cualquier materia en nuestros INSTITUTOS de FORMACION PROFESIONAL está, por lo general, reconocida por razones tanto culturales, como docentes y prácticas; y esto hace que sean incluidas en cualquiera de los estudios científicos que se desarrollen.

La enseñanza de las ciencias en los INSTITUTOS DE FORMACION PROFESIONAL, ha de cumplir varias funciones, tales como proporcionar a los estudiantes un proyecto sistemático y completo, como observador, que les lleve a la experimentación y pueda estimar un valor relativo de los resultados, que personalmente y con colaboración vaya consiguiendo.

Tiene que proporcionar a todos los alumnos un conocimiento del mundo material y al mismo tiempo una base muy sólida, que le permita estar suficientemente capacitado para poder continuar realizando estudios superiores, dentro del conjunto grande o pequeño, que sus deseos o capacidad le lleve principalmente a efectuar dicha misión.

Pero aparte de obtener estos resultados, también se ha de llevar a los alumnos, a que lo que han conseguido, sea correctamente comprendido por otros, en cualquiera de los niveles intelectuales que quiera exponerse.

Esta misión afecta a todos los Profesores de todas las materias y han de esforzarse en que los alumnos se expresen de modo claro y sucinto de todo aquello que quieren decir. Por ello, los Profesores de Ciencias, nunca deben estar dispuestos a aceptar un trabajo, que esté por debajo de la expresión de los temas de carácter literario. Deben fomentar la incorporación a una formación general, destacando las cualidades de observación correcta e imparcial. Estos buenos hábitos, son los que posteriormente han de tener que aplicar en la vida real.

Las Ciencias contribuyen también a adquirir una comprensión inteligente de las cosas, que le permite ver cómo la sociedad humana de hoy día es incompatible con la ignorancia científica, y que la civilización moderna depende de los conocimientos que el hombre adquiera, y permite mantener el nivel científico sin llegar a deteriorarse o reducir su valor.

Las Ciencias impartidas en nuestros INSTITUTOS DE FORMACION PROFESIONAL, deben proporcionar a sus alumnos los conocimientos más destacados sobre los que está basada nuestra civilización, y relacionarlos con los cambios de idearios, condiciones humanas y desarrollo de la humanidad.

El valor cultural de las Ciencias depende de cómo sean enseñadas, y el Profesor no debe interrumpir su explicación después de haber expuesto los pormenores del descubrimiento, sino continuar exponiendo las repercusiones y consecuencias sociales del tema en particular.

Toda oportunidad debe ser aprovechada para correlacionar el tema explicado con cualquier otra materia, que el alumno tenga en sus estudios.

El conocimiento de las Ciencias tiene en verdad un valor inminentemente práctico, no sólo para aquella minoría que lo aplica en todo su valor, sino que al llegar al ámbito de la vida ordinaria, podemos aprovecharla, es decir, que en esta vida moderna el valor de la Ciencia pueda ser apreciado por gobernantes, hombres de negocios y cuantos desde sus cargos de dirección, influyan en su manera de actuar.

Por lo tanto, los INSTITUTOS DE FORMACION PROFESIONAL deben tender a demostrar como los principios científicos pueden ser aplicados a problemas tanto grandes como pequeños, incluyendo, desde los que afectan al hombre en general, como a los recursos alimenticios, y hasta los que se refieren al hogar y al campo.

4. INICIACION A LA INVESTIGACION

Creemos que la enseñanza científica tiene dos fines: En primer lugar proporcionar al alumno los conocimientos indispensables necesarios en los tiempos modernos, ya se trate de la vida normal y corriente, o de la profesional; en segundo lugar, formar el espíritu en una disciplina y en un método, que sólo la práctica de las ciencias puede aportarle y que luego transmitirá a todos los actos mientras dure su existencia.

La enseñanza de la Física y de la Química, por lo que en sí mismas son, por la contribución que aportan al desarrollo de otras Ciencias y por sus aplicaciones prácticas, es de trascendental importancia.

Pero la resolución de los múltiples problemas en la vida práctica no es solo un asunto de conocimientos, no encontrando el hombre una respuesta idónea e instantánea. Casi siempre aproxima el problema que se le plantea a otro que ya ha resuelto anteriormente y pide a su experiencia la solución que busca.

Ocurre con frecuencia que esta experiencia no está a su alcance debido a la dificultad de su realización y a la amplitud de medios que se requieren; entonces por necesidad, ha de buscar las indicaciones precisas en las fuentes de información, tanto abundantes como escasas, que un periódico o revista pueden ofrecer.

La práctica de la experimentación, del problema razonado, de la documentación bibliográfica, necesitan de una educación previa, una formación particular del espíritu y un adiestramiento sistemático y continuo, y es el Profesor, el que corrigiendo los errores y haciendo que los problemas se presenten en progresión respecto a las dificultades y en la variedad que son indispensables, es el Profesor el encargado de que el alumno adquiera esa educación y ese adiestramiento al que se alude. En esto consiste fundamentalmente la cultura científica.

A todos los niveles, incluso el más modesto, creemos que la enseñanza debe tener un valor educacional, es decir, de formación cultural, de formación científica, de imparcialidad, de hábito riguroso, que implica perseverancia y que repercute sobre toda la formación intelectual.

Para el científico tiene un excepcional interés el segundo de los fines indicados, sin dejar de acudir al primero. El proceso de formación de una ciencia de observación o experimental es el siguiente:

Observación del fenómeno, acompañada de experimentación cualitativa y cuantitativa, que por comprobación entre la causa y el efecto del fenómeno, no condece a la Ley, que cuando tiene carácter general se llama principio; la observación de los fenómenos y la existencia de las Leyes nos inclinan a buscar una causa común y así formula el científico explicaciones provisionales o hipótesis, que cuando se construyen para que expliquen varios hechos, referidos a una misma cuestión u otras relaciones constituyen la teoría.

Entendemos, que la primera cualidad que debe desarrollar la enseñanza científica es el espíritu de observación ya que el primer acto de todo pensamiento, es captar la realización, que va a proporcionar los datos concretos de su trabajo. Por lo tanto se debe procurar, que los ejercicios de observación tengan en cada lección un lugar de preferencia.

De la observación y casi de una manera insensible, conducimos al alumno a la experimentación, considerando que siempre la experimentación es una pregunta precisa formulada a la Naturaleza y ésta sólo responderá netamente si la pregunta ha sido formulada con nitidez y aunque pensamos que la experiencia tiene una importancia en la enseñanza científica, no la consideramos un fin, sino un medio.

No basta observar un fenómeno cuidadosamente, el científico ha de someter el fenómeno a condiciones distintas de las observadas, es decir, poner en práctica la experimentación.

Observación, experimentación e interpretación, son tres momentos del trabajo del pensamiento científico, pero dichos tres momentos no son absolu-

tamente distintos, sino más bien tres aspectos de dicho trabajo, que en la práctica se complementan.

De todos es conocido, que a causas iguales corresponden los mismos efectos. En ciertos campos de influencia de las ciencias, las leyes que rigen sus correspondientes fenómenos solo tienen carácter de leyes de probabilidad. Las leyes referidas a clases determinadas de fenómenos pueden considerarse en una ley más amplia que la que corresponde a todos; así se elabora una ley general que abarca extensas ramas de las ciencias.

Las leyes pueden relacionar la causa y el efecto sin clasificar las relaciones cuantitativas y pueden considerarse en una fórmula matemática, que exprese la relación numérica entre las causas y los resultados, esta expresión matemática puede traducirse al lenguaje vulgar en leyes cuantitativas.

Señalamos los fines que nos proponemos conseguir en nuestra tarea docente, surgiendo inmediatamente la pregunta ¿qué importa más, lo que queremos enseñar o la manera de cómo hemos de enseñarlo?. En esta pregunta podríamos esquematizar la gran polémica establecida entre el contenido docente y el método didáctico. Cuanto más ascendemos en la jerarquía de los grados de enseñanza, con mayor frecuencia advertiremos opiniones favorables al dominio del contenido.

El Profesor de Formación Profesional, tiene que especializarse en una determinada disciplina y ha de preocuparse de la formación general de los alumnos. Su preparación debe ser síntesis de preparación científica y pedagógica. Este es el ideal que hemos de seguir constantemente: no alejarnos nunca del rigor científico, procurando que el alumno se interese por los problemas que se le plantean, que «viva» por así decirlo, la vivencia y que incluso se sienta investigador y creador de la misma. Por eso hemos de huir dentro de lo posible del método didáctico, aunque sin excluirlo totalmente, ya que la enseñanza didáctica da a un alumno cierta confianza, al mismo tiempo no se considera aislado o abandonado a sus propias fuerzas.

Por mucha importancia que se quiera dar a la actividad del alumno en la enseñanza, hay conocimientos que él no puede inventar, porque son puramente hechos, convenciones o simbolismos, como los símbolos de los elementos químicos. Por lo demás en la parte didáctica de nuestras lecciones hemos de poner un especial cuidado para que nunca resulten pesadas o aburridas, haciendo que los alumnos sigan sus giros y en sus matices en la lógica de su estructura, nuestro pensamiento. Finalmente, nunca debemos dar por terminada nuestra lección, sin estar plenamente convencidos de que su contenido se ha hecho transparente para la inteligencia de nuestro alumno. De esta manera hemos exigido a éste un esfuerzo de adaptación, de penetración en el pensamiento ajeno, que por ser diferente, juzgamos que no es menos activo, ni menos provechoso que el esfuerzo de invención.

Estimamos que la transmisión oral del pensamiento es tan importante como la labor experimental. Estamos en disconformidad con los que mantienen las

ideas de que en las explicaciones orales se pierde el tiempo, restándolo en trabajo de laboratorio.

Sin embargo, repetimos, no debemos de usar el método didáctico, más que lo estrictamente necesario, ya que de ninguna manera nos sentiremos satisfechos de nuestra labor, si no conseguimos los fines que señalamos al principio de este apartado, que los alumnos adquieran conocimientos que queden bien inculcados, pero que adquieran también el método y el espíritu de las Ciencias. por esto esencialmente hemos basado la enseñanza en su forma y en su desarrollo, en su espíritu de investigación y descubrimiento.

Una vez realizado el estudio cualitativo, pasamos, siempre que sea posible, al cuantitativo y una vez, que el fenómeno objeto de estudio haya sido asimilado e interpretado, generalizamos la ley. Esta es una de las mayores dificultades, que los alumnos, sobre todo los de los primeros cursos, encuentran para pasar de lo particular a lo general. A continuación plantearémos problemas numéricos en el encerado, mediante los cuales, hacer ver, que las leyes de la Física y de la Química, tienen una expresión matemática, que permite resolver con facilidad los problemas, que no son más que hechos concretos a los que puede aplicarse la ley General, que se ha deducido.

Creemos que la resolución de problemas numéricos es uno de los medios más poderosos de la enseñanza de la Física y Química, ya que mientras no se sepa resolver un problema de aplicación inmediata de una ley, no se tiene pleno conocimiento de ésta. Los problemas constituyen para el alumno un excelente ejercicio, que le permite adquirir una precisión y una profundidad de conocimientos imposibles de alcanzar por otro método.

En la resolución de problemas numéricos distinguiremos dos períodos: Uno de iniciación o aprendizaje, en el que los problemas se hacen por todos los alumnos simultáneamente, al mismo tiempo que insistimos en la aplicación de la teoría conocida, y otro período de perfeccionamiento en el cual los alumnos trabajan por cuenta propia. Podemos así comprobar en este segundo período los resultados obtenidos por los alumnos. Estos dos períodos no han de ser forzosamente sucesivos, sino alternados. De este modo se consigue que el interés del alumno no decaiga, ya que se considera como un poco descubridor de la Ciencia que va aprendiendo y por otra parte se habitúa a reaccionar por su cuenta, a encontrar relaciones entre causas y efectos, a generalizar y aplicar a casos concretos y particulares, las leyes generales.

El método que aquí hemos señalado a grandes rasgos, es el que hemos venido desarrollando en nuestras experiencias docentes, y aunque no podemos decir que estamos plenamente satisfechos de los resultados obtenidos, ya que sentimos dentro de nosotros ansias de superación y creemos que la labor pedagógica, como toda actividad humana es capaz de perfeccionarse continuamente, sin embargo creemos, que algo hemos conseguido. Los alumnos que han alcanzado estas directrices, se llegan a interesar por los problemas más científicos y no se limitan a repetir lo que estudian sin haber llegado a entenderlo.

5. SITUACION DE LA INVESTIGACION CIENTIFICA EN EL MOMENTO ACTUAL

Dada la importancia de la investigación y su gran repercusión, tanto a nivel social como económico, consideramos que el tema en sí, no se ha tratado con profundidad, posiblemente porque las personas responsables de su desarrollo, no han comprendido, que el futuro de nuestro país, que posee escasos recursos económicos y pocas materias primas, necesita fundamentalmente de una tecnología propia, que pueda por un lado absorber el potencial humano, pero cualificado en su más amplio sentido, incluyendo a todos sus niveles y servicios, y por otro que permita mantener un nivel de competitividad imprescindible, no ya necesario en cuanto a su posible desarrollo, sino también a su misma supervivencia.

No hay duda de que para un desarrollo tecnológico, es necesario potenciar el sistema investigador, dotándole de los medios precisos. Sin investigación no es posible pensar en desarrollo tecnológico.

Nuestro país importa tecnología, y por ella pagamos un elevado precio, pero es por esto, por lo que una investigación bien planificada, en un campo determinado, debería mejorar dicha tecnología, creando incluso otra nueva, que permita prescindir de dicha importación.

Para planificar y posteriormente desarrollar tecnología, a cualquier nivel, es necesario contar con unos objetivos y unos medios. En nuestro caso está claro que los objetivos son imprecisos y los medios a todas luces insuficientes, no sólo referido al factor humano, sino también a los fondos operativos.

Como objetivos primordiales de la ciencia como creación, aparece la denominada investigación básica o fundamental, pero que en general podríamos llamarla «sin responsabilidad», y que se desarrolla en algunos centros oficiales muy concretos, pero que están encargados de cumplir con una misión, sin más consecuencias. Junto a ésta también aparece la llamada investigación aplicada, que podríamos llamar «con responsabilidad» y que está orientada a la búsqueda de nuevas técnicas. Esta es la investigación que admite una planificación total y flexible, que garantice su eficacia, es decir, que sea resolutive e innovadora.

Una planificación bien hecha, es la concebida a medio y largo plazo, pero sobre todo «independiente o apolítica» de tal forma que no exista repercusión o incidencia alguna en su desarrollo, por posibles cambios políticos.

Los campos de acción de la investigación son amplios y muy diversos, y en ellos se puede realizar un fructífera labor, pues desde la conservación del medio ambiente, hasta el estudio y selección de nuevos cultivos, pasando por los no menos importantes, como los estudios sobre la erradicación de enfermedades y los estudios geotérmicos, y de materias primas, si bien son diferentes, poseen un denominador común, que es el hombre, el «hombre investigador».

El sistema investigador oficial, debería estar más en contacto con los proble-

mas que tiene planteados el sistema productivo, para lo cual deberían colaborar más estrechamente entre ellos.

Pero la investigación que debiera realizarse no ya en las Universidades, sino también en el Bachillerato y sobre todo en la Formación Profesional, ha de ser «libre», con el fin de crear ciencia, formar investigadores y cooperar a la formación del profesorado, si bien para ello deben ser coherentes los programas docentes de las distintas Cátedras y Departamentos, pues no hay duda que determinadas disciplinas se prestan muy poco a una investigación básica, mientras que otras como la Física y la Química, desarrollan principalmente este tipo de investigación.

Por último, decimos que seguiremos insistiendo ante la Administración, para que dentro de sus limitaciones económicas nos vaya dotando de los medios precisos, para poder desarrollar nuestros programas, tanto docentes como de investigación. La siembra científica ya se ha realizado, y no regatearemos esfuerzos para que prosiga y se acreciente en el futuro.

CAPITULO II

METODOS EXPERIMENTALES

1. PREPARACION DE LAS MUESTRAS

a) *Tamización.* Todas las muestras empleadas, fueron desecadas al aire y pasadas por tamiz de 2 mm. de luz de malla.

b) *Dispersión.* El proceso que hemos empleado es el siguiente: se pesan 70 gramos de muestra de suelo y se colocan en un frasco de vidrio de 1000 ml. llenándose de agua destilada. Se agita durante 8 horas o más si fuera necesario, hasta su dispersión total. El contenido se vierte en un vaso de 1000 ml. y después de 4 minutos se sifona hasta una profundidad de 10 cm., con lo que se extrae el limo y la arcilla. Se añade nuevamente agua destilada y después de agitar con una varilla, se vuelve a sifonar al cabo de 4 minutos, operación que se repetirá hasta que el líquido sifonado sea claro. En el vaso quedan la arena fina y gruesa, que una vez lavadas y secas se separan por tamización.

Para separar el limo y la arcilla, se realiza por medio de una sedimentación de 8 horas, después de las cuales se sifona hasta 10 cm. de profundidad. El limo queda en el fondo y la arcilla se concentra por medio de una bujía CHAMBERLAND. Esta operación se repite hasta que el líquido sifonado sea claro.

2. ANALISIS MECANICO

La determinación se realiza según el método INTERNACIONAL DE LA PIPETA (1): Se pesan 20 gramos de suelo tamizado y seco al aire, se colocan en un vaso de 800 ml. de forma alta y se agregan 60 ml. de H_2O_2 al 6%, se dejan 50 minutos (mejor una hora), para que actúen en frío H_2O_2 , calentando a continuación en baño maría y agitando fuertemente para que no salga espuma. Si el suelo contiene materia orgánica, cuando disminuye la intensidad de la reacción, se van

agregando nuevamente 30 ml. de H_2O_2 . Se calienta al baño maría; esto se repite (pocas veces será necesario) hasta que al agregar H_2O_2 , no se produzca espuma. Lavar los bordes del vaso y diluir a 150 ml. Hervir a fuego fuerte durante 5 minutos y dejar enfriar.

Una vez destruida la materia orgánica, se añaden 25 ml. de ácido clorhídrico 2N, o bien si el suelo contiene más del 2% de CO_3Ca , adicionar 2,5 ml. de ácido clorhídrico por cada 1% de carbonato en exceso. Agitar bien y dejar en reposo una hora. Diluir con agua destilada hasta aproximadamente 250 ml., agitar y sacar del agitador. Dejar en reposo unos minutos, decantar el líquido que sobrenada tan completamente como sea posible. Volver a lavar con agua destilada, dejar en reposo y decantar. Transvasar el residuo totalmente a un vaso de 300 a 350 ml., procurando no llenar las 3/4 partes. Se le añaden 10 ml. de dispersante (I) y se pone en agitador horizontal durante 8 horas.

Terminada la agitación, por tamiz de mallas cuadradas de 2 décimas de milímetro (rechaza 0,2 mm.), se colocan sobre la boca de una probeta de 1000 ml. Se arrastra bien el residuo con el frasco lavador y agua caliente. Lavar cuidadosamente el tamiz para que no quede limo ni arcilla, uniendo las aguas con la suspensión.

En el residuo que queda en el tamiz es la arena gruesa se vierte sobre cápsula tarada y se deseca en la estufa a $150^\circ C$ durante dos o tres horas y se pesa. Esta será la arena gruesa.

El líquido que ha pasado a la probeta de 1000 ml. se agita por inversión durante un minuto, dejando en reposo 4 minutos y 48 segundos. A los 4 minutos 28 segundos (o sea veinte segundos antes de finalizar el tiempo anteriormente indicado), se introducen 10 cm. en la pipeta ROBINSON de 20 ml. con la llave cerrada y a los 20 segundos se hace la succión, hasta que el líquido rebasa la llave de la pipeta. El líquido se vierte en la cápsula, se deseca al baño maría, y luego de tres horas en la estufa a $105^\circ C$ se pesa. Este peso será la cantidad de *limo más arcilla* (0 — 0,2 mm.) que habrá en los 20 ml., que refiriéndolo al volumen total, nos dará la cantidad total de limo más arcilla existente en los 20 g. Sobre esta cantidad se determinan los tantos por ciento.

Se repite la operación solamente variando el tiempo de sedimentación, se agita durante un minuto y se deja sedimentar durante 8 horas, al cabo de las cuales se introduce la pipeta ROBINSON 10 cm. de profundidad, se vierte este líquido sobre una cápsula, se lava la pipeta recogiendo en la cápsula el líquido procedente del lavado, se evapora al baño maría y se deseca en la estufa a $105^\circ C$ durante tres horas pesándose después de frío. Este peso será la cantidad de arcilla existente en los 20 ml., refiriéndolo al total nos dará la cantidad de *arcilla*

(I) *Agente dispersante*: 125 g. de fosfato monosódico (PO_3H_2Na , H_2O_2), se pone en una cápsula de platino y se calienta despacio hasta $650^\circ C$ y se mantiene esta temperatura durante hora y media. La cápsula se agita y se vierte el contenido en una placa de mármol limpio formando cintas. Se disuelven 37,70 g. de metafosfato y 7,79 g. de CO_3Na_2 en un litro.

correspondiente a 20 g. Sobre esta cantidad se determinan los tantos por ciento.

Como tenemos un poco de limo más arcilla y otro de arcilla, por diferencia de éstos tendremos la cantidad de limo.

El líquido que queda en la probeta, se decanta y el sedimento se pasa a un vaso de precipitado de unos 600 ml. que se llena de agua hasta una altura de 10 cm. agitando nuevamente. Se deja en reposo 4 minutos y 48 segundos, pasados los cuales se decanta el líquido turbio y se vuelve a llenar de agua el vaso, continuando el lavado del material hasta que el líquido que se decante sea claro.

El residuo se recoge en la cápsula y se deseca, se pesa y sobre éste se determina el tanto por ciento de la *arena fina*.

3. DETERMINACION DEL INDICE DE «RIEKE»

a) *Determinación del límite líquido*

El objeto de este ensayo es el de definir las características plásticas del material a analizar (2).

El aparato para la determinación del límite líquido es la cuchara CASAGRANDE, con un acanalador plano que se ajuste a las dimensiones normalizadas (fig. 1). Su base será de goma dura y deberá cumplir la siguiente condición: Dejando caer sobre ella una bolita de acero de 7,94 mm. de diámetro (5/16 de pulgada), desde una altura de 25 cm., la altura de rebote deberá oscilar entre el 75 y el 90%.

La muestra se prepara separando unos 100 g. de la fracción que pasa por el tamiz nº 40 de la serie ASTM, se amasa con la cantidad de agua destilada necesaria para obtener una pasta moldeable. Se deja la mezcla en reposo durante una hora por lo menos, y amasar de nuevo, añadiendo agua si fuera preciso, al final de este período.

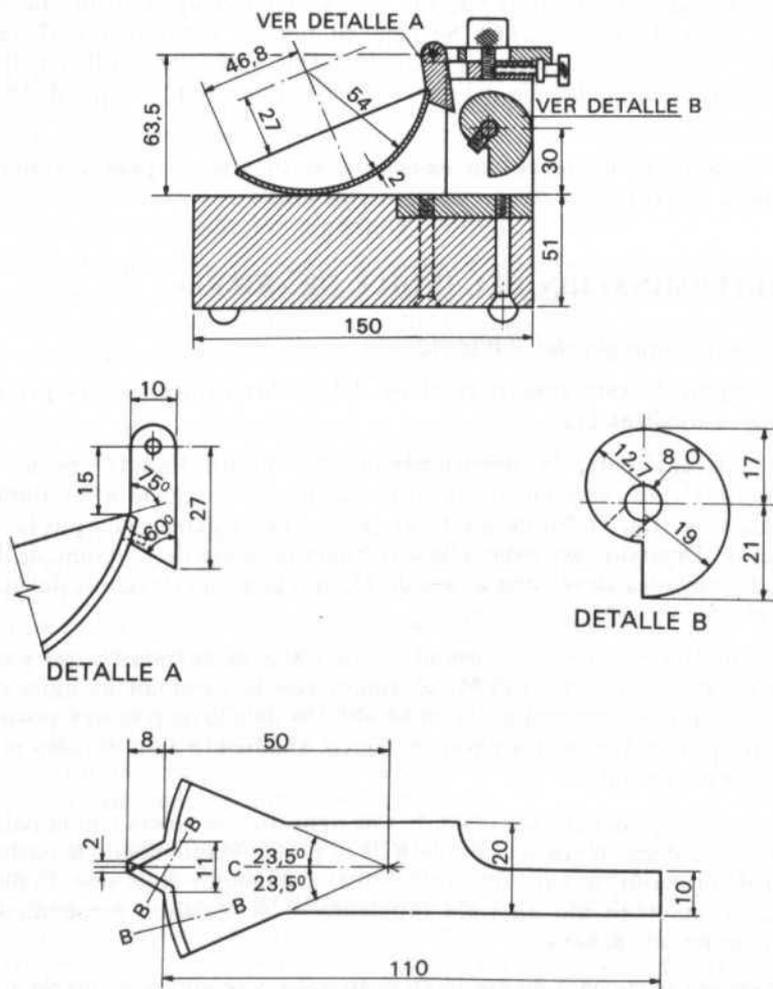
Se separa la cuchara del resto de este aparato y se sujeta con la palma de la mano, y se coloca en ella una porción de la pasta. Manteniendo la cuchara en la palma de la mano, se hace un surco con el acanalador en el sentido del eje AB (fig. 2) y manteniendo en todo momento el acanalador perpendicular a la superficie de la cuchara.

Se coloca la cuchara de nuevo en el aparato, y se gira la manivela a razón de dos vueltas por segundo. Contar los golpes necesarios para que las paredes del surco se unan por el fondo del mismo en una longitud de 12 cm.

Si los golpes necesarios están comprendidos entre 10 y 40, se toma una muestra de unos 5 a 10 g. del material próximo a las paredes del surco, en la parte donde se cerró.

Se coloca en un pesasustancias y se pesa.

FIGURA 1



NOTAS

LA CAZOLETA SERA DE BRONCE
 LA BASE SERA DE GOMA DE LA DUREZA QUE SE ESPECIFICA. SU DIMENSION NORMAL A LA SUPERFICIE DEL PLANO SERA DE 125 MM.
 LAS COTAS EN MM.

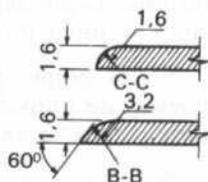
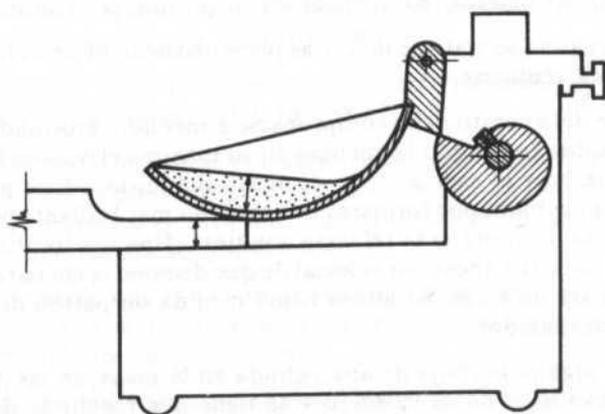
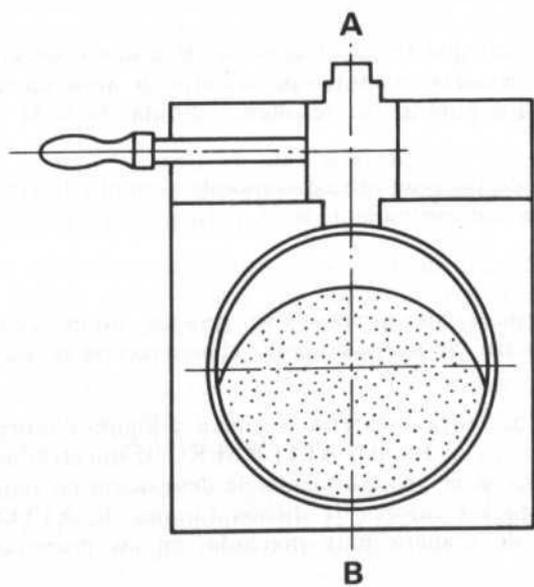


FIGURA 2



Se repite el ensayo con distintas humedades hasta obtener dos determinaciones con menos de 25 golpes y otras dos con más. Se seca en estufa a 105-110^o C, las porciones tomadas en el pesasustancias y se pesa después.

Para calcular el contenido en agua de las porciones de materia tomadas en los pesasustancias se hace por medio de la siguiente fórmula: $M. \text{ húmedo} - M. \text{ seco} \cdot 100 / M. \text{ seco}$.

Se hace un gráfico que tenga en abscisas el número de golpes en escala logarítmica y en ordenadas en tantos por cientos de agua en escala natural o logarítmica, situar los puntos que resulten y dibujar la recta media que une dichos puntos.

Se lee el contenido de agua que corresponde al punto determinado por esta recta y la ordenada correspondiente a 25 golpes. Este es el límite líquido.

Observaciones:

Por tratarse de materiales arcillosos sin gruesos, no es necesario ni conveniente secar la muestra. Se puede empezar el ensayo con la muestra en estado natural.

Las muestras que tengan materia orgánica y algunos inorgánicos, sufren cambios importantes en los Límites ATTERBERG, si son secadas en estufa. Por esto no debe emplearse el procedimiento de desecación en estufa, también el secado al aire altera los valores de dichos Límites de ATTERBERG, pero generalmente sólo de manera muy marcada, en las muestras con materia orgánica.

Por ello es conveniente evitar todo secado, como se ha hecho en las muestras estudiadas en este trabajo.

Cuando la muestra sea muy plástica, o interese más la precisión que el tiempo empleado en el ensayo, este período de una hora puede ampliarse a una noche (dieciocho horas). En este caso se deja la muestra cubierta con una cápsula o plástico en su defecto, para evitar en lo posible la evaporación.

Asimismo cuando se trate de muestras poco plásticas, el período de una hora de reposo podrá reducirse.

—El calibre del aparato debe comprobarse a menudo, ajustándolo si no está exacto. Está calibrado cuando la cuchara en su máxima elevación tiene el punto donde golpea la base al caer a 1 cm. de altura del mismo. Este punto se sitúa fácilmente en la cuchara, por formarse una mancha más brillante por los golpes, o bien con ayuda de aceite; o se refuerza con tinta. Una vez localizado el punto de golpeo, se ajusta el dispositivo especial de que dispone la cuchara hasta que la altura de caída sea de 1 cm. Se utiliza como medida un patrón de que dispone el mango del acanalador.

—Si queda alguna burbuja de aire ocluida en la masa, en las proximidades del surco, el resultado no es valedero y se tiene que repetir la determinación

Tampoco es válido el resultado si la unión de las paredes del surco se produce por deslizamiento de la masa sobre la cuchara.

-Para que el número de golpes necesario disminuya, se repite la determinación amasando la muestra con más agua. Para aumentar el número de golpes hay que disminuir el contenido en agua, extendiendo la pasta para que se evapore, o amasando con muestra que tenga menos contenido en agua, pero que haya sufrido el mismo proceso de amasado que la muestra ensayada. Nunca debe añadirse muestra seca para disminuir el contenido en agua. Lo más conveniente es empezar la primera determinación del lado seco del límite líquido, y para las siguientes, ir añadiendo agua gradualmente.

—Como el acanalador se suele desgastar mucho, habrá que comprobar periódicamente que sus dimensiones son las fijadas por las normas NLT-105/58 (2) para repararlo si es necesario.

—Existe un método simplificado para la determinación aproximada del límite líquido basado en el hecho comprobado experimentalmente, de que empleando escalas logarítmicas, tanto en abscisas (nº de golpes) como en ordenadas (% de humedad), los puntos representativos de las distintas determinaciones están en línea recta, y además esta recta tiene una pendiente constante para muestras del mismo origen. Incluso para muestras de orígenes diferentes la variación de dicha pendiente es reducida.

En la práctica se opera de la siguiente manera: Se verifica una determinación con el nº de golpes comprendido entre 15 y 35, y se toma la humedad como en el método normal. A continuación se quita la cazoleta, y se vuelve a amasar en la misma la muestra sin añadir agua. Se repite la determinación, y si en nº de golpes no difiere del anterior, se vuelve a tomar humedad. Se dibujan los dos puntos aquí obtenidos, y por el punto medio se traza una recta con la pendiente fijada.

b) *Determinación del límite plástico*

El objeto de este ensayo es la determinación de las características plásticas de la muestra a analizar. Norma NLT-106/58 (2).

Se parte de una masa preparada para la determinación del límite líquido como se indica en la Norma NLT-105/58 (2).

Se toma una pequeña porción de masa, hacer unos cilindros rodándola entre la palma de la mano y una superficie lisa. El contenido de humedad debe ser tal, que al llegar al diámetro de tres mm., la masa esté lo suficientemente plástica para que los cilindros no se resquebrajen.

Se vuelve a hacer una bola con el material, y se repite el proceso cuantas veces sea necesario hasta que al llegar al diámetro de unos tres mm., se vea que el cilindro se resquebraja en toda su masa.

Se continúa procediendo de este modo hasta reunir unos 10 g. de esta masa

en un pesasustancias tarado, y se seca en una estufa a 105-110° C, hasta peso constante. La operación se repite otra vez más, siguiendo el mismo procedimiento.

El límite plástico es la medida de los tantos por ciento de agua de las muestras tomadas en los pesasustancias. Su valor se calcula como sigue:

$$\text{Límite plástico} = \frac{\text{M. húmeda} - \text{M. seca}}{\text{M. seca}} \times 100$$

Observaciones:

Los valores que suelen darse como representativos de las características plásticas de un suelo, son el límite líquido y el índice de plasticidad, siendo éste igual a la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico ya descrito.

—Como superficie lisa se suele utilizar una placa de cristal esmerilado, una losa de mármol, etc., nosotros hemos utilizado la primera.

A veces se emplea sobre estas superficies una hoja de papel absorbente para acelerar la desecación, pero hay que tener la seguridad de que no suelta pelusa que pudiera influir en los resultados obtenidos.

El hecho de que al llegar a los tres mm. el cilindro se parta, no quiere decir que se haya alcanzado el límite plástico, es preciso que toda la masa se resquebraje visible y uniformemente, debido a su pérdida de coherencia por falta de humedad, este punto es muy crítico y puede apreciarse muy exactamente.

—Si los resultados obtenidos en cada una de las dos determinaciones dan una dispersión apreciable, el ensayo debe repetirse.

c) Índice de Rieke

Se obtiene por diferencias entre el LIMITE LIQUIDO y el LIMITE PLASTICO.

ESTUDIO DE LAS MUESTRAS

1. PLANO DE SITUACION EN LA ZONA

Ver página siguiente

2. LOCALIDADES A LAS QUE PERTENECEN

Muestra nº	1	ALDEANUEVA DE FIGUEROA
Muestra nº	2	ALDEANUEVA DE FIGUEROA
Muestra nº	3	ALDEARODRIGO
Muestra nº	4	ALDEARODRIGO
Muestra nº	5	ARCO
Muestra nº	6	CALZADA DE VALDUNCIEL
Muestra nº	7	IZCALA
Muestra nº	8	IZCALA
Muestra nº	9	PALACIOS DEL ARZOBISPO
Muestra nº	10	PARADA DE RUBIALES
Muestra nº	11	SANTIZ
Muestra nº	12	SANTIZ
Muestra nº	13	TARDAGUILA
Muestra nº	14	TOPAS
Muestra nº	15	TOPAS
Muestra nº	16	VALDELOSA
Muestra nº	17	VALDELOSA
Muestra nº	18	VALDELOSA
Muestra nº	19	VALDELOSA
Muestra nº	20	VILLANUEVA DE CAÑEDO
Muestra nº	21	ZAMAYON

Se trata de suelos pardos pseudogleyizados sobre areniscas asociados a Rotlehn relicto (3).

SITUACION DE LA ZONA
EN LA PROVINCIA



L E Y E N D A

 TIERRAS PARDAS PSEUDOILEYADAS SOBRE ARENISCAS ASOCIADAS A BOTILEM RELICTO.

 SUELOS PARDOS CALCIMORFOS Y AFUORRAMIENTOS CALIZOS.

ESCALA 1 : 200.000



SALAMANCA

3. DESCRIPCION DE LAS MUESTRAS ESTUDIADAS

MUESTRA Nº 1

- LOCALIDAD: Aldeanueva de Figueroa.
- SITUACION: A 500 m. pasado el pueblo, margen izquierda carretera La Velles-Fuentesaúco.
- TOPOGRAFIA: Llano, suavemente inclinadas al norte.
- DRENAJE: *Exterior:* Regular.
Interno: Regular - malo.
- DESCRIPCION: *1-a:* Corresponde a una extensa zona dividida por la carretera. Aparece un corte poco profundo en el que se observa un aumento de la cantidad de arena.
1-b: Horizonte homogéneo, algo arenoso y muy compacto.
- APLICACIONES: Son tierras dedicadas actualmente a labores agrícolas.

MUESTRA Nº 2

- LOCALIDAD: Aldeanueva de Figueroa.
- SITUACION: Límite de la Provincia Salamanca-Zamora.
- TOPOGRAFIA: Llano en depresión no muy acentuada.
- DRENAJE: *Exterior:* Regular - malo.
Interior: Malo.
- DESCRIPCION: *2-a:* Corte amplio y bastante profundo, realizado por la erosión del agua. En la parte superior es ligeramente arenoso, pero disminuye con la profundidad.
2-b: Corresponde a un corte profundo y homogéneo producido por una regatera.
- APLICACIONES: En la actualidad está cubierto superficialmente por tomillos y jarales.

MUESTRA Nº 3

- LOCALIDAD: Aldearrodrigo.
- SITUACION: Camino de Valdelosa, pasada la Cerámica de S. Miguel.
- TOPOGRAFIA: Suavemente ondulado.
- DRENAJE: *Exterior:* Regular - malo.
Interior: Malo.

DESCRIPCION: 3-a: Tierras pardas rojizas, algo gredosas con alguna cuarcita superficial.
3-b: Corte de características análogas al anterior pero de color más claro.

APLICACIONES: Son tierras que llevan dedicadas a actividades agrícolas durante muchos años.

MUESTRA Nº 4

LOCALIDAD: Aldearrodrigo.

SITUACION: A 400 metros pasado el pueblo, margen derecha en dirección a El Arco.

TOPOGRAFIA: Ondulado.

DRENAJE: *Externo:* Regular.
Interno: Malo.

DESCRIPCION: 4-a: Son tierras pardo limosas, muy homogéneas en extensión y profundidad.
4-b: Corresponde a un corte poco profundo, pero muy homogéneo.

MUESTRA Nº 5

LOCALIDAD: El Arco.

SITUACION: A 500 metros pasando el pueblo, carretera de San Pelayo, margen derecha.

TOPOGRAFIA: Llano, ligeramente inclinado hacia la izquierda.

DRENAJE: *Externo:* Regular.
Interno: Regular - malo.

DESCRIPCION: 5-a: Se trata de un corte profundo, tomado de un pozo abandonado y seco, horizonte muy regular, de color rojizo.
5-b: Horizonte de color gris claro, muy compacto y homogéneo.

APLICACIONES: Son tierras dedicadas actualmente a explotaciones agrícolas.

MUESTRA Nº 6

LOCALIDAD: Calzada de Valdunciel.

SITUACION: A 500 metros de la margen izquierda de km. 4 de la carretera a Valdelosa.

- TOPOGRAFIA:** Ondulada.
- DRENAJE:** *Interno:* Regular.
Externo: Malo.
- DESCRIPCION:** *6-a:* Corresponde a un corte profundo de gran amplitud, color pardo rojizo y textura limo-arcillosa; horizonte muy homogéneo y compacto.
6-b: Horizonte profundo de color rosáceo muy homogéneo y compacto.
- APLICACIONES:** Una parte se encuentra sembrada de girasoles y la otra está dedicada al cultivo de remolacha con su correspondiente instalación de riego por aspersión.

MUESTRA Nº 7

- LOCALIDAD:** Izcala.
- SITUACION:** Pasando la ribera de Izcala, C.N. 630, PK. 233.500 margen derecha, 1 km.
- TOPOGRAFIA:** Ondulado.
- DRENAJE:** *Externo:* Regular.
Interno: Malo.
- DESCRIPCION:** *7-a:* Corte poco profundo, arenoso, de color pardo y muy homogéneo.
7-b: Se trata de un horizonte muy homogéneo y compacto, de color grisáceo y profundo.
- APLICACIONES:** La mayor parte es monte bajo, con encinas y alcornoques.

MUESTRA Nº 8

- LOCALIDAD:** Izcala.
- SITUACION:** Límite con la provincia de Zamora, margen derecha.
- TOPOGRAFIA:** Ligeramente ondulado.
- DRENAJE:** *Exterior:* Malo.
Interior: Malo.
- DESCRIPCION:** *8-a:* Horizonte de color pardo rojizo de gran extensión, profundo y homogéneo, tomado en una pequeña depresión allí existente.
8-b: Corte en profundidad, horizonte de color grisáceo, muy compacto y regular.
- APLICACIONES:** Abarca una gran extensión cubierta de monte bajo, con jaras y tomillos.

MUESTRA Nº 9

- LOCALIDAD: Palacios del Arzobispo.
- SITUACION: Carretera de Zamayón a Santiz, PK. 4,100, a 300 m. margen derecha.
- TOPOGRAFIA: Ligeramente ondulado.
- DRENAJE: *Externo:* Malo.
Interno: Malo.
- DESCRIPCION: 9-a: Horizonte extenso y profundo, homogéneo y compacto, en su superficie se aprecian abundantes grietas.
- APLICACIONES: En la actualidad está dedicado a explotación de cereales.

MUESTRA Nº 10

- LOCALIDAD: Parada de Rubiales.
- SITUACION: A 2,5 km. pasado el pueblo en dirección a Aldeanueva de la Ribera.
- TOPOGRAFIA: Llano con ligera inclinación hacia la izquierda.
- DRENAJE: *Externo:* Regular.
Interno: Malo.
- DESCRIPCION: 10-a: Horizonte poco profundo, homogéneo y compacto de color grisáceo.
10-b: Corte profundo muy compacto de color grisáceo con características semejantes al anterior.
- APLICACIONES: Durante muchos años ha estado dedicado a cultivo de cereales, hoy en día se encuentra abandonado.

MUESTRA Nº 11

- LOCALIDAD: Santiz.
- SITUACION: Carretera de Santiz con el límite de la Provincia de Salamanca-Zamora, PK. 6,200 margen derecha.
- TOPOGRAFIA: Ligeramente ondulado.
- DRENAJE: *Exterior:* Regular - malo.
Interior: Malo.
- DESCRIPCION: 11-a: Corte poco profundo muy amplio, de color pardo rojizo, homogéneo y compacto.
11-b: Corte profundo, de color grisáceo, muy homogéneo y compacto.

APLICACIONES: Terrenos dedicados a cultivos de cereales y leguminosas. Parece como si se hubiera extraído hace tiempo pequeñas cantidades de este material, aunque no se sabe si para ser utilizadas de forma artesanal.

MUESTRA Nº 12

LOCALIDAD: Santiz.

SITUACION: Camino de Valdelosa a Santiz, a 4,5 km. de este pueblo.

TOPOGRAFIA: Ondulado, ligeramente inclinado.

DRENAJE: *Externo:* Regular.

Interno: Malo.

DESCRIPCION: *12-a:* Corte poco profundo, posee una textura limo-arcillosa, horizonte homogéneo.

12-b: Es un corte de características semejantes al anterior, pero más compacto.

APLICACIONES: Son tierras que se dedican indistintamente al cultivo de cereales y leguminosas.

MUESTRA Nº 13

LOCALIDAD: Tardaguila.

SITUACION: Camino de Tardaguila a Topas, a 6,5 km. del primero.

TOPOGRAFIA: Llano.

DRENAJE: *Externo:* Regular.

Interno: Malo.

DESCRIPCION: *13-a:* Se trata de un corte poco profundo, de color pardo rojizo, horizonte homogéneo que queda ampliamente puesto de manifiesto en una regatera allí existente, y muy compacto.

13-b: Corte poco profundo, de color pardo claro, muy compacto y uniforme.

APLICACIONES: En la actualidad está sembrado de trigo, aunque alterna con otros cereales. Nunca se ha tratado de utilizar dichas tierras para usos industriales.

MUESTRA Nº 14

LOCALIDAD: Topas.

SITUACION: A 1,5 km. pasado el pueblo en dirección a Huelmos, C.N.-630.

- TOPOGRAFIA:** Llano, ligeramente inclinado hacia la derecha.
- DRENAJE:** *Externo:* Regular.
Interno: Malo.
- DESCRIPCION:** *14-a:* Corte poco profundo, horizonte de color pardo rojizo, amplio y homogéneo.
- APLICACIONES:** Solo se le conoce dedicado a cultivos de cereales y leguminosas.

MUESTRA Nº 15

- LOCALIDAD:** Topas.
- SITUACION:** A 200 m. de la línea de ferrocarril Salamanca-Zamora, límite de la Provincia.
- TOPOGRAFIA:** Ondulado.
- DRENAJE:** *Exterior:* Regular.
Interior: Malo.
- DESCRIPCION:** *15-a:* Corresponde a un horizonte de color pardo, de textura limo-arcillosa, el corte es amplio, homogéneo y muy compacto.
15-b: Horizonte profundo de color pardo claro-grisáceo, de textura limo-arcillosa, muy homogéneo.
- APLICACIONES:** Es monte bajo en gran extensión, que se adentra en la Provincia de Zamora. Hay zonas en las que se observa que se han realizado movimientos de tierras, aunque no parece haber sido destinados a uso industrial.

MUESTRA Nº 16

- LOCALIDAD:** Valdelosa.
- SITUACION:** Rodería del Barrero (Barrero de Cerámica Valdelosa, S.L.).
- TOPOGRAFIA:** Ondulación parte alta.
- DRENAJE:** *Externo:* Malo.
Interno: Malo.
- DESCRIPCION:** *16-a:* Corresponde a un horizonte de color gris, muy extenso y profundo y a la vez homogéneo, cambia de color a medida que se profundiza.
16-b: Situada bajo una capa de arenisca de 1 m. de espesor y bien cementada de color rojizo; el horizonte arcilloso es de color grisáceo.
16-c: Situado entre dos capas de arenisca, de color ama-

rillenta-rojiza; el horizonte es de color gris claro, homogéneo y muy compacto.

APLICACIONES: Material base mezclando los diferentes cortes, para la fabricación de ladrillos y tejas.

MUESTRA Nº 17

LOCALIDAD: Valdelosa.

SITUACION: Carretera a Valdelosa, km. 6,5 margen derecha, regatera.

TOPOGRAFIA: Depresión.

DRENAJE: *Exterior:* Regular.
Interior: Malo.

DESCRIPCION: *17-a:* Corte profundo de color pardo rojizo limo-arcilloso, compacto y homogéneo, tomado en una regatera profunda.
17-b: Horizonte profundo de color grisáceo, homogéneo y compacto.

APLICACIONES: En la actualidad está dedicado a cultivo de cereales y leguminosas. Próximo a este lugar afloran areniscas muy cementadas y de grano fino, parece ser que se debe a la existencia de una gran falla que forma el valle que allí se inicia.

MUESTRA Nº 18

LOCALIDAD: Valdelosa.

SITUACION: Rodera del Barrero, camino de la estación de Huelmos, a 1,6 km. del primero.

TOPOGRAFIA: Ondulado.

DRENAJE: *Externo:* Regular.
Interno: Malo.

DESCRIPCION: *18-a:* Horizonte muy profundo de color grisáceo, bajo una pequeña capa de arenisca de color blanco muy fina y compacta.
18-b: Corte profundo de color gris claro, muy homogéneo y compacto.

APLICACIONES: En la actualidad será cubierto en una gran extensión por arbustos, encinas y algún alcornoque. Muy próximos a donde se tomaron las muestras, existen cortes nada definidos de los que se ha extraído material que parece ser fue

empleado para la fabricación de piezas manuales, botijos, platos, etc.

MUESTRA Nº 19

LOCALIDAD: Valdelosa.

SITUACION: Teso de los Buitres, margen izquierda del regato, parte alta.

TOPOGRAFIA: Ondulada con pendiente hacia el valle.

DRENAJE: *Exterior:* Regular - malo.
Interior: Malo.

DESCRIPCION: *19-a:* Corte muy profundo, extenso, homogéneo y compacto. Sobre la superficie se encuentran abundantes grietas, algunas hasta de 10 cm. de profundidad.
19-b: Corresponde a un corte profundo de las mismas características que el anterior.

APLICACIONES: La parte superior del monte se encuentra abandonada actualmente, aunque se notan los surcos de haber sido arado hace tiempo. La ladera del mismo se dedica a cultivos agrícolas, y en la parte baja hay un huerto abandonado. No hay indicios de extracción de materiales para usos cerámicos.

MUESTRA Nº 20

LOCALIDAD: Villanueva de Cañedo.

SITUACION: A 1,5 km. de la finca «Huelmos», camino a la CN-630, frente a la carretera que conduce al castillo del Buen Amor. Antiguo tejár.

TOPOGRAFIA: Ondulado, parte superior.

DRENAJE: *Exterior:* Regular.
Interior: Malo.

DESCRIPCION: *20-a:* Corte muy profundo, procedente de excavaciones anteriores, de color rojizo, textura limo-arcillosa, correspondiente a un horizonte homogéneo y compacto.
20-b: Corte muy profundo, de color grisáceo, en horizonte homogéneo y muy compacto.

APLICACIONES: Existen restos de dos hornos árabes, no presentan actividad ninguna, se encuentran abandonados. En su día se fabricaban tejas, adobes y botijos.

MUESTRA Nº 21

- LOCALIDAD: Zamayón.
- SITUACION: Camino de Valdelosa a Zamayón, a 2.5 km. del primero.
- TOPOGRAFIA: Ondulado.
- DRENAJE: *Externo:* Regular.
Interno: Malo.
- DESCRIPCION: *21-a:* Corresponde a un corte poco profundo, regular y muy compacto, de color pardo rojizo.
21-b: El corte deja al descubierto el horizonte considerado, de color pardo grisáceo, irregular en su espesor, pero compacto.
- APLICACIONES: En la actualidad se dedica al cultivo de cereales y leguminosas, no advirtiéndose ningún signo de extracción de materiales en la zona, para uso en cerámica.

CAPITULO III

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSION

1. COMPOSICION GRANULOMETRICA

Las tierras objeto de estudio, poseen una composición granulométrica bastante regular.

En la fracción arena gruesa, los porcentajes obtenidos varían entre el 1% de la muestra 25-b, al 33,4% en la 1-b.

En la fracción arena fina, la variación está comprendida entre el 1,5%, en la muestra 21-a, y el 31,1% en la 8-a.

Para la fracción limo, el margen de oscilación es más amplio, y varía desde un 10,0% en la muestra 2-a, hasta el 68,5% en la 21-a.

En la fracción arcilla se dan los porcentajes más elevados y uniformes; varían entre el 18,0% en la muestra 23-a, y el 52,1% en la 10-b.

Las fracciones limo más arcilla, se encuentran en proporción elevada en la mayoría de las tierras estudiadas. Los porcentajes obtenidos oscilan entre el 47,8, en la muestra 1-b, y el 94,0 en la 21-a.

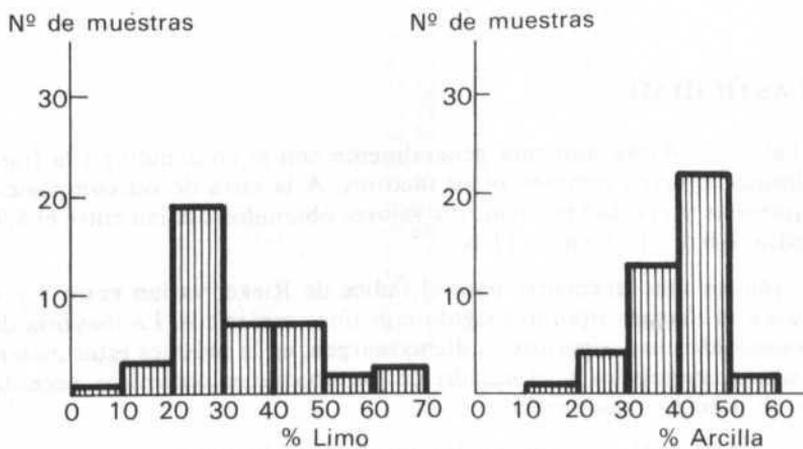
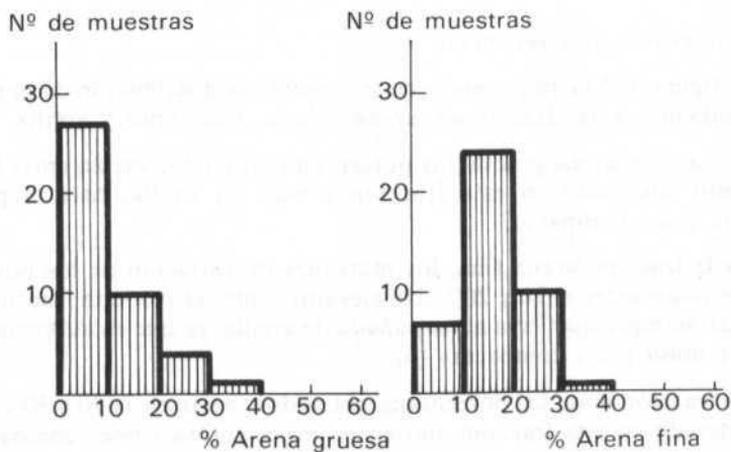
Los valores obtenidos, según el análisis mecánico, para la composición granulométrica de las muestras estudiadas, se exponen en la TABLA I.

2. ANALISIS MECANICO

TABLA I

Muestra nº	Prof. cm.	Arena Gruesa (%)	Arena Fina (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Limo Arcilla (%)
1-a	0-50	29,0	20,5	11,0	37,7	48,7
1-b	50-125	33,4	18,1	13,6	34,2	47,8
2-a	0-45	27,2	18,3	10,0	44,3	54,3
2-b	45-185	23,5	17,2	12,1	47,0	59,1
3-a	0-60	16,0	22,0	26,0	35,8	61,8
3-b	60-200	14,0	18,0	24,5	42,5	67,0
4-a	0-35	18,1	14,5	30,0	36,2	66,2
4-b	35-115	15,3	15,1	28,2	40,4	68,6
5-a	0-150	8,0	15,8	37,1	38,6	75,7
5-b	150-210	5,6	14,6	35,4	43,7	79,1
6-a	0-60	9,0	15,1	30,0	44,2	74,2
6-b	60-185	8,0	18,2	28,1	45,0	73,1
7-a	0-50	26,0	16,1	27,0	29,1	56,1
7-b	50-165	15,1	10,5	30,0	43,0	73,0
8-a	0-80	7,0	31,1	22,2	38,3	60,5
8-b	80-215	3,0	14,6	27,1	44,2	71,2
9-a	0-110	8,0	26,2	23,5	41,3	64,8
10-a	0-75	6,5	22,1	29,0	41,4	70,4
10-b	75-145	4,2	16,1	26,5	52,1	78,6
11-a	0-85	17,0	13,5	36,1	32,1	68,2
11-b	85-210	12,0	13,0	32,5	41,2	73,7
12-a	0-45	1,5	10,6	59,7	27,2	86,9
12-b	45-100	2,0	8,5	47,0	41,3	88,3
13-a	0-60	5,1	22,5	29,4	44,0	73,4
13-b	60-135	2,5	15,2	39,2	41,1	80,3
14-a	0-55	8,0	24,5	23,2	43,1	66,3
14-b	35-115	10,5	24,0	28,1	35,2	63,3
15-a	0-85	4,0	13,5	42,2	39,3	81,5
15-b	85-210	1,5	10,0	36,0	51,5	87,5
16-a	100-700	5,0	1,5	68,5	25,5	94,0
16-b	700-1000	4,5	2,5	48,6	31,2	79,8
16-c	11 m.-18 m.	8,5	7,3	42,1	40,1	82,2
17-a	0-300	7,2	2,5	60,5	28,0	88,5
17-b	300-800	10,3	1,9	51,6	34,1	85,6
18-a	0-700	2,0	9,1	67,2	18,0	85,2
18-b	700-1100	6,0	14,2	41,2	37,2	78,4
19-a	100-800	8,0	25,2	24,1	41,4	65,5
19-b	800-1000	10,2	20,0	25,0	44,2	69,2
20-a	0-200	2,5	14,0	42,0	40,2	82,2
20-b	200-350	1,0	22,8	40,0	34,1	74,1
21-a	0-80	7,5	21,3	22,2	47,6	69,8
21-b	80-140	4,3	19,6	25,6	49,4	75,0

FIGURA 3
HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS



Las propiedades tecnológicas, que poseen los materiales cerámicos, dependen directamente de la composición granulométrica del producto natural, referida a su contenido en arena, limo y arcilla, así como de los minerales que constituyen la fracción fina (5 y 6).

«El material que se emplee en la fabricación de productos cerámicos, debe ser fundamentalmente de naturaleza íltica, y caolinítica, con pequeñas cantidades de montmorillonita. La presencia de caolín en cantidad elevada, mejora considerablemente la calidad del producto elaborado» (6).

a) *Histograma de frecuencias*

En la figura 3 (Ver pág. anterior), se presenta la distribución de porcentajes correspondientes a las fracciones, arena gruesa, fina, limo y arcilla.

En la fracción arena gruesa, los porcentajes obtenidos varían entre 0 y 10%. Un elevado contenido en esta fracción y bajo en arcilla, hace el producto elaborado, poco compacto.

«Para la fracción arena fina, los márgenes de variación de los porcentajes obtenidos están entre el 10 y 20%. Un elevado contenido en esta fracción, no es perjudicial, siempre que vaya acompañado de arcilla, ya que en ausencia de ésta, daría una masa poco compacta» (6).

«En la fracción limo, los porcentajes obtenidos varían entre 20 y 30%. Un elevado contenido en esta fracción, daría una masa untosa y poco compacta» (6).

Para la fracción arcilla, los márgenes de variación de los porcentajes de frecuencia corresponden entre el 30 y el 40%. Al poseer abundante cantidad de esta fracción, se obtiene una masa de características cerámicas muy buenas.

Según se desprende de los valores obtenidos, un aumento en el grado de finura de la fracción, implica una tendencia hacia valores de porcentajes más elevados.

3. PLASTICIDAD

El índice de Rieke aumenta generalmente con el contenido en la fracción fina, aunque influyen también otros factores. A la vista de sus composiciones físico-químicas y granulométricas, los valores obtenidos oscilan entre el 5,95 en la muestra I-b y 21,71 en la II-b.

Los valores más frecuentes para el índice de Rieke, varían entre 7 y 12, y constituyen el margen óptimo exigido con fines cerámicos. La mayoría de los valores obtenidos son superiores a dicho margen, en la práctica estos materiales deben usarse mezclados y el secado de los productos cerámicos necesita un período de tiempo más amplio.

En la TABLA II, se exponen los resultados obtenidos.

TABLA II
PLASTICIDAD

Muestra nº	Límite líquido	Límite plástico	Índice de Rieke
1-a	24,08	16,25	7,83
1-b	27,10	21,15	5,95
2-a	27,80	14,10	13,70
2-b	28,60	13,90	14,70
3-a	19,01	8,30	10,79
3-b	18,70	7,80	10,90
4-a	40,48	24,30	16,18
4-b	36,15	19,50	16,65
5-a	38,26	13,70	14,56
5-b	37,18	11,90	15,28
6-a	23,44	8,19	15,25
6-b	22,33	6,22	16,11
7-a	26,48	14,18	12,30
7-b	24,32	10,62	13,70
8-a	27,08	12,82	15,26
8-b	24,21	8,51	15,70
9-a	40,46	21,94	18,52
10-a	41,92	24,72	17,20
10-b	41,70	23,63	18,07
11-a	43,98	21,87	21,61
11-b	39,36	15,65	21,71
12-a	34,61	17,22	17,39
12-b	31,73	13,97	18,76
13-a	26,17	11,83	14,34
13-b	26,03	12,07	13,96
14-a	38,62	21,13	17,49
14-b	33,84	17,28	16,66
15-a	26,30	16,52	9,78
15-b	30,17	12,23	17,94
16-a	40,20	19,80	20,40
16-b	34,92	18,84	16,02
16-c	33,27	14,56	18,71
17-a	34,20	18,10	16,10
17-b	33,78	20,98	12,80
18-a	39,80	20,18	19,62
18-b	32,91	14,82	18,09
19-a	40,60	22,35	18,25
19-b	40,15	21,12	19,03
20-a	28,17	13,15	15,02
20-b	27,16	13,12	14,04
21-a	41,71	24,62	17,09
21-b	40,12	22,16	17,96

4. INFLUENCIA DE LAS ALTAS TEMPERATURAS EN LAS ARCILLAS

Según se presenta en la figura 4, al someter a un producto cerámico elaborado y seco a 110°C , a un aumento gradual de temperatura, se observa una primera contracción que una vez estabilizada, comienza un cambio de coloración que pasa del color grisáceo natural, hasta el marrón oscuro.

La zona de cambio más notoria, tiene lugar a partir de los 900°C y 1.150°C , para su control, se ha ido comprobando la variación de color cada 50°C , es decir a 900° , 950° , 1.050° , 1.100° , 1.150° y 1.200°C .

Al alcanzar la temperatura de 1.150° a 1.200°C , la masa cerámica sufre una expansión, con el correspondiente aumento de volumen, debido al contenido de elementos alcalinos, fundamentalmente calcio y magnesio, pero que una vez ya frío, presenta un aspecto rústico, de agradable acabado y muy decorativo, pero que posiblemente en la práctica sea más difícil de conseguir.

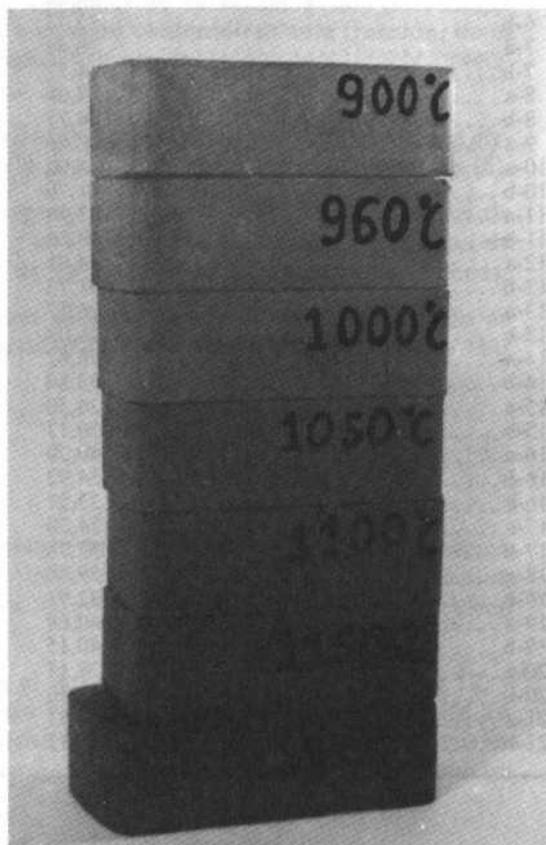


FIGURA 4

ALTERACIONES
PRODUCIDAS EN UN
PRODUCTO
CERAMICO
MEDIANTE
INCREMENTO DE
LA TEMPERATURA

ESTUDIOS COMPARATIVOS

La naturaleza de la fracción arcilla, constituye el factor más importante, si queremos realizar un estudio comparativo, entre la composición granulométrica y su plasticidad; y según los valores obtenidos, parece existir dicha relación.

Si la plasticidad estuviera solo determinada por la fracción arcilla, debería existir una correlación lineal con los valores experimentales.

No obstante, aunque sea en la fracción arcilla, donde radica toda actividad plástica, se debe también considerar la influencia que ejercen sobre la misma las fracciones limo y arena fina.

Para una determinación de la plasticidad correcta, se deben conocer especialmente los minerales que constituyen la fracción arcilla. Los minerales más frecuentes en este tipo de arcilla son: Ilita, Caolín, Montmorillonita y Atapulgita (5).

Para poder establecer posibles correlaciones entre las propiedades cerámicas, es necesario conocer las contracciones, grado de porosidad, y expansiones de los materiales cerámicos.

APLICACIONES

De los materiales que hemos estudiado, correspondientes a una amplia zona del Nordeste de la Provincia de Salamanca, podemos decir, que en su totalidad son aptos para la fabricación de tejas y ladrillos, ya empleados mezclados o solos

No obstante, hemos fijado nuestra atención en la zona que comprende a ALDEARRODRIGO - VALDELOSA - VILLANUEVA DE CAÑEDO; que poseen materiales de características muy semejantes y que permiten pensar en un aprovechamiento integral más concreto.

Los yacimientos existentes en la zona de referencia constituyen una reserva en materia primas francamente ilimitada, es decir, calculada para siglos.

Una explotación adecuada de dichas materias primas dedicadas a la fabricación de cerámica fina, podría ser una razón poderosa para crear un gran complejo cerámico, en el que tendría cabida no sólo la cerámica industrial, sino también la meramente artesanal.

Considerando que tanto Salamanca ciudad, como su provincia, carecen de fabricados cerámicos, y que todos los materiales que emplean en la construcción como: bovedillas, ladrillos caravista, piezas especiales, etc., proceden de las provincias limítrofes, quedaría muy justificado el desarrollo del proyecto indicado anteriormente.

Hasta hace poco tiempo, existían en esa zona familias enteras dedicadas a los trabajos artesanos, prueba de ello son las referencias que hacen a lo mismo personas que aunque ya retiradas de toda actividad laboral, evocan las excelencias de esas arcillas, con las que ellos elaboran, botijos, ollas y pucheros.

Dado el carácter eminentemente agrícola de la zona, y salvo dos pequeñas explotaciones existentes, la incidencia socio-económica que tendría en toda la comarca el emplazamiento del complejo cerámico, sería extraordinaria, pues por un lado permitiría recoger las experiencias y técnicas artesanales, de un

pasado que se nos va cada día y que se acabará si no se pone remedio, y por otro permitiría un desarrollo técnico e industrial de una zona muy pobre.

Los sondeos realizados en cuanto a estudios de mercado se refiere, permitirían la absorción de una elevada producción, no sólo en nuestra provincia, sino también en las limítrofes, e incluso exportarla a la vecina Portugal.

Estamos ante un plan ambicioso, los primeros pasos ya se han dado, su realización y puesta en marcha, no es labor de uno solo, los problemas serán muchos, pero solucionarlos es labor de conjunto, es labor de todos.

CONCLUSIONES

La misión de los alumnos en las tareas de la investigación, con su participación activa, fomenta el estímulo y preocupación por su vocación e influye en su formación de manera positiva.

Las propiedades tecnológicas de los materiales cerámicos radican en su composición granulométrica, así como en los minerales que constituyen la tracción arcilla.

Todas las muestras de tierras arcillosas estudiadas, se pueden considerar como aptas para la fabricación de productos cerámicos elaborados de tipo común, como tejas y ladrillos.

Existe una zona comprendida entre los términos de ALDEARRADRIDO Y ALDEOSA - VII LANUEVA DE CAÑEDO, cuyos materiales arcillosos poseen unas características muy semejantes y consideradas como aptas para la elaboración de cerámica fina.

Una explotación racional y a gran escala de dicha zona permitiría agrupar por un lado a la industria artesanal, hoy en franco declive, y por otro a la cerámica industrial, que produce ladrillos, cerámica, vajillas, azulejos, fajas y otras piezas especiales.

En la actualidad, tanto SALAMANCA capital como Provincial son deficitarias en productos cerámicos, que tienen que importar de las provincias limítrofes.

El emplazamiento de un complejo cerámico en esta zona, tendría una repercusión socio-económica extraordinaria en toda la región.

CONCLUSIONES

—La iniciación de los alumnos en las tareas de la investigación, con su participación activa, fomenta el estímulo y preocupación por su vocación e influye en su formación de manera positiva.

—Las propiedades tecnológicas de los materiales cerámicos radican en su composición granulométrica, así como en los minerales que constituyen la fracción arcilla.

—Todas las muestras de tierras arcillosas estudiadas, se pueden considerar como aptas para la fabricación de productos cerámicos elaborados de tipo común, como tejas y ladrillos.

—Existe una zona comprendida entre los términos de ALDEARRODRIGO VALDELOSA - VILLANUEVA DE CAÑEDO, cuyos materiales arcillosos poseen unas características muy semejantes y consideradas como aptas para la elaboración de cerámica fina.

—Una explotación racional y a gran escala de dicha zona, permitiría agrupar por un lado a la industria artesanal, hoy en franco declive, y por otro a la cerámica industrial, que produciría, ladrillos caravista, bovedillas, azulejos, losetas; y otras piezas especiales.

—En la actualidad, tanto SALAMANCA capital como Provincia, son deficitarias en productos cerámicos, que tienen que importar de las provincias limítrofes.

—El emplazamiento de un complejo cerámico en esa zona, tendría una repercusión socio-económica extraordinaria en toda la región.

BIBLIOGRAFIA

(1) THUMR: *Método Internacional de la Pipeta. Die untersuchung von Boden*, Edit. Neumann Brelag, Berlín, 1955.

(2) *Normas de ensayo. Laboratorio de mecánica y transporte del suelo*, NLT 105/58 y NLT 106/58, 1963. M.O.P.U. Madrid.

(3) *Los duelos de la Provincia de Salamanca*, I.O.A.T.O., Publicado por la Excma. Diputación Provincial de Salamanca, 1964.

(4) VILAS, L.: *Composición química y condiciones de formación de las arcillas españolas*, Anal. Edaf., I, 7, 1942.

(5) VICENTE HERNANDEZ, M.A.; GONZALEZ GARCIA, S. Y SANCHEZ CAMAZANO, M.: *Estudio de las arcillas cerámicas de la Provincia de Salamanca*, I. Estudio Físicoquímico, Bol. Soc. Esp. Ceram. y Vidrio; Vol. 13, nº 12, 129-141, 1974.

(6) VICENTE HERNANDEZ, M.A.; GONZALEZ GARCIA, SALVADOR, Y SANCHEZ CAMAZANO, M.: *Estudio Tecnológico de arcillas cerámicas de la Provincia de Salamanca*, Anu. Cent. Edaf. Biol. Apli. Salamanca. Vol. I, 115-135, 1975.

BIBLIOGRAFIA

- (1) THOMAS: Método funcional de la fibra. Die untersuchung von Fäden. Ed. Neumann Neumann, Berlin, 1955.
- (2) Normas de ensayo. Laboratorio de mecánica y transporte del suelo. N.I.T. 105-58 y N.I.T. 106-58, 1963. M.O.P.U. Madrid.
- (3) Los datos de la Provincia de Salamanca. I.O.A.T.O. Publicado por la Excma. Diputación Provincial de Salamanca, 1964.
- (4) VILLAS, L.: Composición química y condiciones de formación de las arcillas españolas. Anst. Edal., t. 7, 1945.
- (5) VICENTE HERNANDEZ, M.A.; GONZALEZ GARCIA, S. y SANCHEZ CAMAÑO, M.: Estudio de las arcillas cerámicas de la Provincia de Salamanca. I. Estudio Fisicoquímico. Bol. Soc. Esp. Ceram. y Vidrio; Vol. 13, nº 12, 130-141. 1974.
- (6) VICENTE HERNANDEZ, M.A.; GONZALEZ GARCIA, SALVADOR, Y SANCHEZ CAMAÑO, M.: Estudio Tecnológico de arcillas cerámicas de la Provincia de Salamanca. An. Cent. Edal. Biol. Apli. Salamanca, Vol. 1, 115-135, 1975.

101	ESTUDIOS COMPARATIVOS	
102	APLICACIONES	
103	CONCLUSIONES	
104	BIBLIOGRAFIA	

INDICE

INTRODUCCION	123
CAPITULO I	
LA INVESTIGACION COMO UNA RAMA DE LA CIENCIA	125
1. Método Científico	127
2. Objetivos de la Ciencia	127
3. Importancia de la enseñanza de las ciencias	128
4. Iniciación a la investigación	129
5. Situación de la investigación científica en el momento actual	133
CAPITULO II	
METODOS EXPERIMENTALES	135
1. Preparación de las muestras	135
2. Análisis mecánico	135
3. Determinación del índice de «Rieke»	137
ESTUDIO DE LAS MUESTRAS	143
1. Plano de situación en la zona	143
2. Localidades a las que pertenecen	143
3. Descripción de las muestras estudiadas	145
CAPITULO III	
RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSION	155
1. Composición granulométrica	155
2. Análisis mecánico	156
3. Plasticidad	158
4. Influencia de las altas temperaturas en las arcillas	160
	167

ESTUDIOS COMPARATIVOS.....	161
APLICACIONES.....	162
CONCLUSIONES.....	164
BIBLIOGRAFIA.....	165

ÍNDICE

(The following text is extremely faint and largely illegible due to low contrast and bleed-through from the reverse side of the page. It appears to be a detailed index or table of contents listing various entries and their corresponding page numbers.)

**EVALUACION
DE LA ENERGIA SOLAR EFECTIVA
EN SALAMANCA**

EVALUACION
DE LA ENERGIA SOLAR EFECTIVA
EN SALAMANCA

El presente trabajo ha sido realizado en el Departamento de Física del Aire de la Universidad de Salamanca, bajo la dirección del Prof. Dr. D. JOSE GARMENDIA IRAUNDEGUI, a quien expreso mi gratitud. Asimismo quiero expresar mi agradecimiento al Prof. Dr. D. JESUS MATEOS CAÑIZAL, por los valiosos consejos y orientaciones que me ha dispensado durante la realización del mismo.

PRESENTACION

La necesaria, aunque pueda parecer simple, obtención y tratamiento de datos locales de la Radiación Solar, vendría avalada no sólo por la importancia en los momentos actuales de disponer de fuentes energéticas, frente a la contestada alternativa nuclear, sino por el valor intrínseco de éstos.

Baste considerar tres campos en los que nuestro trabajo encuentra una aplicación más o menos directa:

- El aspecto industrial donde la energía es factor preponderante y en el cual, la alternativa solar supondría una disminución apreciable en los costes.
- El ámbito agrícola donde, al existir un desfase entre el contenido hídrico del suelo y la radiación global empleada en su evaporación, pudiera favorecer en definitiva un mayor aprovechamiento de las reservas hidrológicas.
- Finalmente no podemos olvidar que la Radiación Solar es en último término responsable de los procesos fotoquímicos en la atmósfera, con una doble incidencia, tanto en el aspecto agrícola (graves lesiones en cosechas y arbolado), como en el medio ambiente, con la posibilidad de transformación de ciertos componentes, originando ambientes biológicamente nocivos.

*El hombre no tendría nada que pedir a Dios,
si supiera predecir correctamente el tiempo.*

M.V. Lomonosov (1711-1765)

*...Estoy convencido de que la acción mutua
entre el campo del movimiento y el campo de
la radiación es tan complicada que apenas
vistulbramos su verdadera importancia*

E.N. Lorenz

V Congreso de la O.M.M., 1967

1. INTRODUCCION

Es patente que hoy la radiación solar desborda el aspecto puramente científico, y que pasa a ser patrimonio general de la opinión pública.

Si bien, esto tiene su parte positiva que se traduce en una progresiva sensibilización de personas, agrupaciones y organismos; tiene el inconveniente de que no toda la información que se suministra, tiene el rigor científico ni la objetividad necesaria, que justifiquen su difusión pública.

La importancia de los estudios realizados y los próximos avances tecnológicos en esta rama de la ciencia, no vienen solamente derivados de la grave crisis energética, del progresivo encarecimiento de las fuentes de energía hasta ahora usadas, o de su rápido agotamiento, lo que originará, según el científico King Hubber, que estarán prácticamente agotadas hacia el año 2100; sino, que su aplicación a la bioclimatología y todo lo que social y económicamente implica, el poder desarrollar y obtener una mejora en la agricultura mundial, hacen que los estudios relativos a la radiación solar sean considerados por muchos científicos como la alternativa más interesante, en un plazo medio, a la crisis mundial.

Resulta cada vez más significativa la incidencia de la radiación solar, en el campo de la Meteorología; en este sentido Abernathy (1961), expone ampliamente la incidencia de las variaciones de la energía solar en las enfermedades y tumores que son hoy considerados como mortales.

Sin embargo, paralelamente a los estudios puramente tecnológicos, es necesario abordar un estudio de la radiación solar, que permita conocer las fluctuaciones radiativas que se producen en el espacio y en el tiempo, ya que ello permitirá seleccionar con rigor y prescindiendo de apreciaciones pseudo-

científicas, cuáles son los lugares más idóneos, para el establecimiento de centrales solares o las posibilidades relativas de esta fuente de energía, frente a otras, como la energía nuclear, cuyos riesgos reales aún se desconocen.

Por otra parte, somos conscientes de la importancia de la radiación solar como responsable, en última instancia, de los procesos atmosféricos, así lo afirma una máxima autoridad en la materia, como lo es K.Y. Kondratyev.

Se hace evidente la necesidad de desarrollar la investigación de la radiación solar, que sirva de base para los estudios energéticos, que haga posible establecer una climatología de la radiación solar y que pueda servir de ayuda a otras investigaciones científicas.

Actualmente, y a pesar de que la tecnología en este campo, no está en nuestro país, lo suficientemente avanzada, los estudios llevados a cabo ofrecen actualmente valiosas aportaciones; lo que justifica, una vez más, el trabajo básico en este campo para su posterior aprovechamiento tanto para la tecnología industrial como para otros campos.

Consciente de estas necesidades, el departamento ha abordado el estudio de la radiación solar en la zona de Salamanca, que constituye uno más de los que se vienen desarrollando, en orden a poder ofrecer una perspectiva global y a la vez local de la radiación solar en la Península Ibérica que pudiera, en su día, cristalizar en un estudio a mayor escala.

INTERES DEL TRABAJO

La mayor dificultad que se plantea el investigador a la hora de realizar estudios sobre la radiación solar, es la escasez de datos y fiabilidad de éstos.

En estudios de climatología, este problema se acrecienta, al necesitarse medidas de intervalos de tiempos lo suficientemente extensos, como para poder efectuar estimaciones y/o predicciones con un mínimo de representatividad.

Para algunos problemas particulares, por ejemplo, para la aplicación a la Agricultura, hacen falta algunos elementos climatológicos, que son de interés primordial, como la radiación solar, la humedad del suelo y, sobre todo, lo que actualmente se denomina «microclimatología», que se refiere al estudio detallado de los elementos climáticos en la capa aérea límite directamente influenciada por el terreno y actuante sobre la vegetación.

Estos inconvenientes quedaron resueltos en la realización de este trabajo, al contar con registros pertenecientes al actinógrafo del departamento ubicado en la Base Aérea de Matacán (Salamanca). El Observatorio de Matacán se instaló por primera vez en el año 1938, pero hasta el año 1945 no se hicieron observaciones meteorológicas sistemáticas. (En la ciudad de Salamanca ha existido Observatorio Meteorológico desde 1858 instalado en el Instituto de Enseñanza Media, el cual sigue funcionando en la actualidad).

En el intervalo 1938-1945 se atendió en el de Matacán únicamente a las

necesidades de la protección meteorológica de los vuelos; a partir de 1945 se ha cuidado lo referente a las observaciones climatológicas y sinópticas, ya que ello no se enfrenta con la misión esencial de ser Observatorio de un aeródromo, donde se vuela y se ha volado constantemente porque en él están o han estado funcionando las Escuelas de Vuelo sin Visibilidad, Navegación, Superior de Vuelo, Básica de Pilotos, y actualmente la Escuela Nacional de Aeronáutica (E.N.A.). Antes al contrario, los datos sistemáticos han sido básicos cuando se ha tratado de algún problema técnico, como el de la orientación de las pistas, diseñadas y construidas últimamente.

A continuación, presentamos una serie de datos climatológicos referentes a la citada base, para proporcionar una idea de las condiciones que afectan más o menos directamente a los estudios sobre radiación solar y que orientarán acerca del clima de la región castellana.

a) Viento

Las direcciones más frecuentes corresponden al tercero y primer cuadrante. En realidad domina el tercer cuadrante en la media anual y también mensual, excepto en los meses de abril y julio, en los que prevalecen vientos del primer cuadrante.

b) Presión

La presión media al nivel actual de la cubeta barométrica es 694,7 mm. de mercurio. Resulta algo superior a la presión de la atmósfera tipo standar, y esto se debe a la situación geográfica de Salamanca, que es próxima al cinturón de las altas presiones.

Las presiones máximas superiores a los 705,0 mm. de mercurio se observan en los seis meses más fríos, y en general, bajo condiciones anticiclónicas continentales.

Las presiones mínimas se presentan por la acción de las borrascas que proceden del Atlántico.

Destaca el mínimo pronunciado de presión media en el mes de mayo, que corresponde al mínimo de primavera. En esta época, el número de los anticiclones fríos se ha retirado decididamente y, como aún no han venido las altas tropicales, las depresiones oceánicas inciden con más frecuencia.

c) Temperatura

La temperatura media anual, obtenida como promedio de las máximas medias y de las mínimas es de 12,4 °C. Las temperaturas extremas han sido las siguientes: temperatura máxima: 39,8 °C que se registró el 31 de julio de 1947; temperatura mínima -16,2 °C que se registró el 22 de febrero de 1948. La oscilación extrema fue por lo tanto 56,0 °C.

El clima de Salamanca se clasifica como extremado; tiene un promedio de 67 días al año en que la temperatura desciende de los 0 °C (días de helada) y, 105 días en que la temperatura rebasa los 25 °C (días de verano).

Los días tropicales, o sea, de máxima igual o mayor a 30 °C son 54.

Los meses de junio, julio, agosto y septiembre dan un promedio de temperaturas máximas superiores a 25 °C, por lo que se los considera como meses calurosos. Los meses de julio y agosto podemos clasificarlos como meses tropicales, porque prácticamente alcanzan los 30 °C de promedio las temperaturas máximas.

Ahora bien, como compensación, existe una gran oscilación diurna y, en general refresca mucho por la noche, siendo el promedio mensual de temperaturas mínimas en el mes de julio 13,2 °C.

Los meses de enero y febrero tienen un promedio de temperaturas mínimas inferior a 0 °C, pero solamente se obtiene un promedio de dos días al año en que la temperatura máxima del día no sube de los 0 °C.

Los días de heladas se presentan principalmente en los meses de enero, con un promedio de 20 días, febrero con 14 días y diciembre con 13 días.

d) Nubosidad e Insolación

La nubosidad media es de 4/8 y la insolación media total anual es de 2.713 h. 21 m.

Si nos fijamos en la nubosidad media mensual (promedio de las correspondientes a 7, 13, y 18 horas), se destacan la disminución de la nubosidad en los meses de junio, julio, agosto y septiembre, en los que la nubosidad media es inferior a los 4/8 y los máximos de nubosidad en los meses de mayo y diciembre, que superan los 5/8 de nubosidad.

El máximo absoluto corresponde a diciembre 5,3/8 y el mínimo absoluto a julio con 2,1/8.

Respecto a la insolación, vemos que el mes más soleado es julio con 81,0 por ciento, y el menos diciembre con 36,8 por ciento.

El máximo de insolación se registró en el mes de julio de 1954 con 408 h. 5 m. de horas de sol y, el mínimo el mes de enero del año 1951 con 77 horas de sol.

En correspondencia con estos datos, el máximo de días despejados se acusa en julio y, para los días cubiertos en diciembre.

En julio se tiene una media de 15 días despejados, 15 días nubosos y 1 día cubierto. Por el contrario, en diciembre se tiene un promedio de 4 días despejados, 14 nubosos y 13 días cubiertos.

Es de notar que el mes con menos días despejados es mayo, con un promedio de 2,6 días de esta clase.

e) Estado Higrométrico

La tensión media del vapor es 8,0 mm. y la humedad relativa media 70 %.

La tensión de vapor presenta un máximo en julio, con 11 mm. descendiendo antes y después de este mes, con un mínimo en enero de 5 mm.

La humedad relativa ofrece mucha regularidad con un mínimo en julio y un máximo en diciembre, coincidiendo casi con la temperatura.

Las diferencias del mes de diciembre, respecto del mes de enero y del mes de mayo respecto al mes de abril, concuerdan con las observaciones de nubosidad e insolación.

f) Precipitaciones

El mes de mayo es de precipitación media mensual máxima; le siguen marzo y noviembre, pasando cada uno de los 40 litros mensuales por término medio.

El mes de agosto es el de mínima precipitación, con sólo 6,25 litros de media mensual; le siguen los otros meses calurosos.

Es de destacar que la precipitación media mensual en enero y febrero no llega a los 30 litros; los meses de más días de precipitación son los de invierno y primavera.

Los meses más irregulares, en lo que respecta a la precipitación recogida son julio, noviembre, febrero y octubre; los meses más regulares son junio y diciembre.

Nevadas Suelen ser pocos los días de nevada, la media de los años 1945-1954 da 8 días de nevada al año; de ellos, 5 se reparten entre los meses de enero y febrero.

Generalmente son de poca precipitación y suelen producirse como consecuencia de la llegada de una ola de aire ártico.

Granizadas y Pedriscos No llega a 2 el promedio de días al año en que se observan tales fenómenos y, aunque alguna vez se han dado con tormentas de calor, lo más frecuente es que vengan asociados a frentes fríos con intensa actividad convectiva.

Tormentas Las tormentas son más frecuentes en los meses cálidos. Se deben, en general, a la inestabilidad producida por el calentamiento diurno y, son los meses de mayo, junio y julio los que tienen una media superior a dos tormentas y, en los meses de agosto y septiembre una media superior a una tormenta.

g) Niebla

El número medio de días de niebla anuales es de 25. Si nos fijamos en los datos sobre frecuencia media de días de niebla en cada mes, o sea, de días durante los cuales se ha observado la niebla, independientemente de su duración e intensidad, observamos que el máximo de días de niebla ocurre en los meses

fríos y, si comparamos dicho número medio con el de días de lluvia, vemos que son proporcionales.

Queremos agradecer la colaboración del personal del I.N.M. de dicha base por los cuidados personales referidos al instrumental que el departamento tiene instalados en la misma.

Afortunadamente la sensibilización sobre fuentes energéticas alternativas en concreto la Energía Solar, ha llegado a nuestra ciudad al proyectarse y estar casi ultimado un edificio, patrocinado por la Excelentísima Diputación Provincial y abastecido en parte por este tipo de energía.

Ello bastaría para que un estudio riguroso relativo al tema viera la luz.

El estudio de la radiación global en Salamanca —nótese que corresponde a la energía total que se recibe— tabulada en horas y meses de mayor incidencia radiativa, vendría a ofrecer una gran aportación de datos locales de interés no sólo para estudios de investigación sino para proyectos similares al antes mencionado.

Más aún cuando por desconocimiento del fenómeno, suelen utilizarse variables, tales como el número de horas de sol, considerado erróneamente índice indicador de las posibilidades de los mismos.

Creemos que a la vista de los resultados obtenidos, podemos mantener fundadas esperanzas de que nuestra zona, secularmente abandonada, o considerada como idónea para plantas de tratamiento del combustible nuclear por su proximidad a los lechos primarios del mineral, pueda incrementar sus disponibilidades y recursos, haciendo uso de una energía limpia, barata e inagotable.

OBJETIVOS

Los objetivos que nos proponemos al realizar este trabajo pueden concretarse en los siguientes puntos:

En *primer lugar*, el cálculo de la radiación global R.S.G. teórica recibida en esta zona por una superficie horizontal mediante ecuaciones analíticas.

Para ello, hemos hecho un exhaustivo análisis bibliográfico, que nos aconseja utilizar la ecuación de tipo astronómico ampliamente desarrollada y que reviste gran variedad de expresiones.

En *segundo lugar*, el estudio de la radiación en condiciones atmosféricas normales y en días completamente despejados.

En *tercer lugar* proponer una serie de variables y relaciones cuyo significado físico y apreciaciones se evaluarán posteriormente.

También hemos realizado las consideraciones teóricas necesarias, acerca de las relaciones propuestas.

Finalmente, analizaremos los resultados obteniendo conclusiones que puedan servir de base para próximos y más extensos estudios.

POST EXPERIMENTAL

ANALYSIS OF RESULTS

The first part of the experiment was designed to determine the effect of the amount of time spent in the laboratory on the amount of time spent in the field. The results of this part of the experiment are shown in Table I.

The results of the first part of the experiment show that the amount of time spent in the laboratory has a significant effect on the amount of time spent in the field. The more time spent in the laboratory, the more time spent in the field. This is true for both the amount of time spent in the laboratory and the amount of time spent in the field. The results of the second part of the experiment are shown in Table II.

The results of the second part of the experiment show that the amount of time spent in the laboratory has a significant effect on the amount of time spent in the field. The more time spent in the laboratory, the more time spent in the field.

2. OBTENTION OF DATA AND TREATMENT OF THE DATA

The results of the first part of the experiment are shown in Table I. The results of the second part of the experiment are shown in Table II.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Para la realización del presente trabajo hemos utilizado registros obtenidos en el Observatorio de Matacán (Salamanca). Geográficamente se sitúa a $40^{\circ}56'N$ de latitud, $5^{\circ}28'W$ de longitud y 798 m. de altura sobre el nivel del mar.

1. APARATOS DE MEDIDA

Los registros de la R.S.G. se han obtenido, utilizando un actinómetro de la Cátedra de Física del Aire, tipo Robitzsch, que es uno de los aparatos más estudiados y sencillos, destinado a evaluar valores diarios de radiación solar.

En el modelo de actinómetro «Robitzsch Fuess-38 d», el órgano sensible está constituido por tres láminas, dos de ellas blancas, que no absorben radiación y la otra recubierta de un negro mate fuertemente absorbente; estas láminas están conectadas a un estilete impresor, de forma que las dos láminas blancas permanecen fijas, mientras la lámina negra, al absorber la radiación, se dilata, produciendo así una deformación mecánica, que se comunica al estilete registrador.

Digamos también, que este modelo incorpora mejoras, que favorecen la linealidad de respuesta del aparato.

2. OBTENCION DE DATOS Y ANALISIS DE LOS INSTRUMENTOS

El registro de la radiación recibida por el actinómetro, se efectúa sobre una banda de papel, cada una de las cuales abarca 24 horas (Figura 1). La escala de

ordenadas está graduada de 0 a 2 cal/cm² min. (0-0,084 MJ/m² min.), y en abscisas tenemos tiempo en horas.

Se ha procurado en todo momento, dadas las características del instrumento, seguir las normas internacionales que detallan los investigadores más representativos en este campo; baste citar las siguientes: Drummond, A.J., 1970; Kondratyev, Y.K., 1969; V.M.O., 1961; Robinson, G.D., 1966; Coulson, L.K., 1975.

Para la evaluación de estas bandas hemos realizado, por una parte, una integración por suma de áreas de cintas paralelas al eje de ordenadas; y a continuación se determinaron las mismas áreas con un planímetro HAFF-315, nº 18627.

El paso de unidades de área (mm²), obtenidas con el planímetro, a unidades de energía (MJ/m²), se efectuó teniendo en cuenta que en las bandas actinométricas, 1 mm. equivale a 5,35 minutos en abscisas; y en ordenadas 1 mm. se corresponde con 0,02667 cal/cm² (1,12·10⁻³ MJ/m²) resultando que 1 mm² equivale a 0,143 cal/cm² (6,10⁻³ MJ/m²), siendo este el factor de equivalencia que habrá de tener en cuenta siempre que se quiera convertir valores de área en unidades de energía radiativa (Figura 1). Debe hacerse notar que se han tenido en cuenta los factores de reducción de la distancia solar.

Para los cálculos necesarios en la elaboración del trabajo, hemos utilizado un calculador Hewlett-Packard modelo 9100B. El equipo consta de una unidad básica con 14 registros capaces de alojar datos e instrucciones. Posee una capacidad de 392 pasos de programa; además se cuenta con una extensión de memoria de 247 registros más, que aumenta sensiblemente las posibilidades del instrumento, lo que facilita notablemente el trabajo; digamos que estos datos, para su aplicación posterior, van a ser perforados y procesados en el centro de cálculo de la Universidad de Salamanca.

3. FUNDAMENTOS

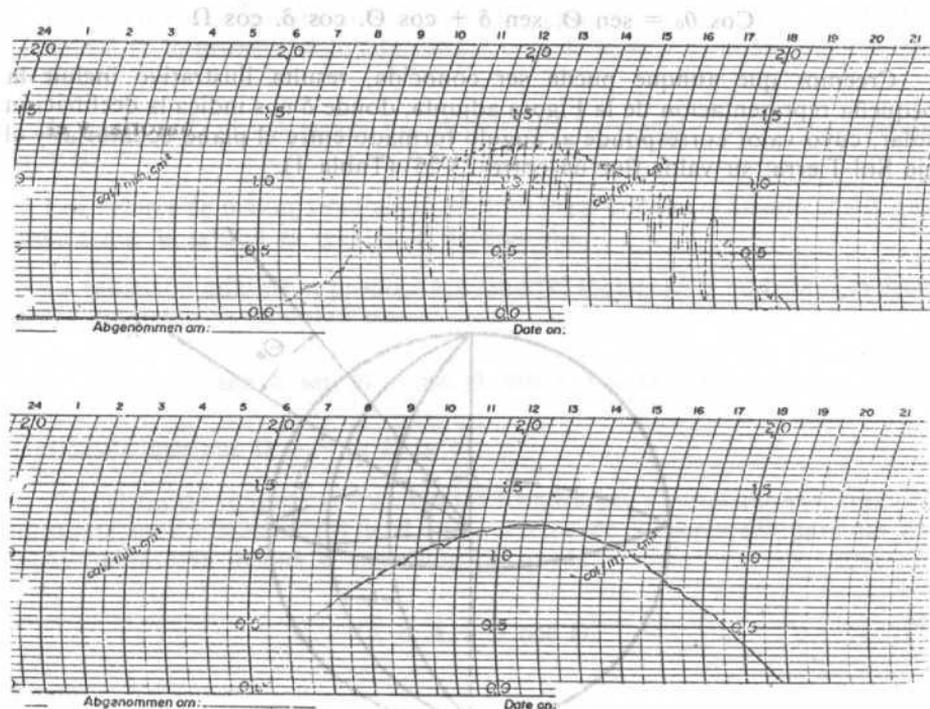
El flujo o energía de la radiación solar sobre una superficie horizontal [1] viene expresada mediante la ecuación:

$$G_0 = I_0/S \cos \theta_0 \quad [1]$$

donde I_0 , representa la constante solar que corresponde a la radiación recibida por una superficie unitaria colocada en el límite de la atmósfera y normal al haz solar.

El valor adoptado para I_0 y correspondiente al espectro solar de Theakekara-Drummond 1973 (120-8000 nm), ha sido homologado por la U.S. National Aeronautics and Space Administration y su valor es de 1,940 cal/cm² min., que en el sistema internacional equivale 1351,53 W/m².

FIGURA 1
EVOLUCION ANUAL DE LAS VARIABLES



S : es el factor de corrección de la distancia media Sol-Tierra; su valor viene definido por la expresión

$$S = D^2 / D_m^2$$

donde:

D = distancia real Tierra-Sol

D_m = distancia media Tierra-Sol

Los valores de S para todo el año (Tabla 1) se encuentran en todos los trabajos generales de radiación solar; Robinson, G.D., 1966; Kondratyev, Y.K., 1969, etc.

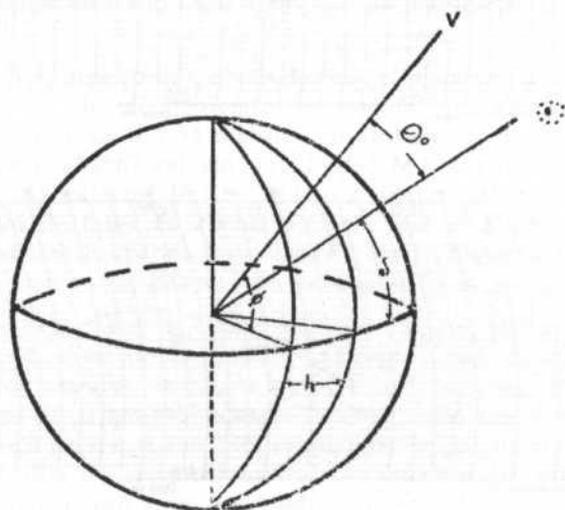
θ_0 : es el ángulo cenital, que forman los rayos solares y la vertical del lugar.

Si representamos la esfera terrestre, observaremos que el ángulo cenital θ_0 , puede expresarse en función de los parámetros θ , δ , Ω .

A partir de los cuales se obtiene para el valor del ángulo cenital, la siguiente expresión trigonométrica.

$$\cos \theta_0 = \text{sen } \vartheta. \text{sen } \delta + \cos \vartheta. \cos \delta. \cos \Omega$$

Creemos que aunque pueda ser conocida, resulta ilustrativo incluir la pequeña representación de la Figura adjunta, donde δ nos indica la declinación solar, cuyo valor corresponde al ángulo formado entre el plano ecuatorial y el eje Sol-Tierra; su valor fluctúa entre $23^{\circ}25'$ (Tabla 1).



ϑ : nos indica la latitud del lugar considerado, aceptándose como positiva en el hemisferio norte y negativa en el hemisferio sur.

Ω : es el ángulo horario, correspondiente al tiempo solar verdadero y es el formado por el plano constituido por el eje de la tierra y la línea Sol-Tierra, y el determinado por el meridiano del lugar.

Tanto S , como δ y Ω son variables periódicas.

Desarrollando la expresión [1] en función de estos nuevos parámetros, se obtiene una expresión de la forma:

$$G_0 = I_0/S^2 (\text{sen } \vartheta. \text{sen } \delta + \cos \vartheta. \cos \delta. \cos \Omega) \quad [2]$$

que nos permite el cálculo del flujo de radiación solar en función de las ordenadas geográficas.

La integración de la fórmula antes citada nos permite obtener una expresión, que determina la energía de radiación solar diaria sin más que introducir los límites de integración adecuados.

$$G_0 = \int_{t_1}^{t_2} I_0/S^2 (\sin \theta. \sin \delta + \cos \theta. \cos \delta. \cos \Omega) dt \quad [3]$$

Debe tenerse en cuenta que tanto en la expresión [1], como en la [2] y [3] deducidas de la primera, sólo son válidas cuando $\theta_0 \leq \pi/2$, lo que implica que $G_0 \geq 0$.

Si $\theta_0 \geq \pi/2$, el sol estará por debajo del horizonte y consecuentemente $G_0 = 0$.

Los valores de máxima radiación tendrán lugar cuando el ángulo $\Omega = 0$, que implica que la latitud es igual a la declinación.

La radiación mínima se producirá, cuando el sol esté en el horizonte, es decir en ese momento se cumplirá que

$$\sin \delta. \sin \theta + \cos \theta. \cos \delta. \cos \Omega = 0$$

implicando que $\cos \Omega = -\operatorname{tg} \theta \operatorname{tg} \delta$

Con el fin de simplificar los cálculos Kondratyev y otros autores, suponen constante la declinación (δ) y el radio vector de la tierra (S) para un día determinado; con lo que la expresión [2] queda:

$$G_0 = A + B \cos \Omega \quad [4]$$

donde:

$$A = I_0/S^2 \sin \theta \sin \delta$$

$$B = I_0/S^2 \cos \theta \cos \delta$$

A partir de la ecuación [4] hemos obtenido los valores promedios decenales en cada mes, con intervalos en ángulo horario de 5° , que corresponden a una variación de 10 min. en tiempo.

Hemos considerado más representativo el cálculo de las energías radiativas para los siguientes intervalos horarios: 06,00-09,00 h.; 09,00-12,00 h.; 12,00-15,00 h. y 15,00 ocaso, evaluando también la energía global diaria.

La elección de estos intervalos ha sido motivada por dos razones fundamentales; en primer lugar en toda la bibliografía consultada, existen estudios análogos a Kondratyev, Y.K., 1969, en donde se pone de manifiesto esta elección; en segundo lugar, realizando un estudio de la evolución diaria de la radiación solar vemos que existe un intervalo variable a lo largo del año donde la radiación recibida es mínima; se observa a continuación un rápido crecimiento, llegando finalmente a lo que se denomina «meseta radiativa»; correspondiéndose estos tres períodos en la evolución con los intervalos de tiempo analizados.

4. EVALUACION DE LA ENERGIA RADIATIVA

La energía teórica recibida en la superficie horizontal durante los intervalos considerados, así como diariamente, ha sido calculada mediante la integración de la expresión [3]; y comprobada posteriormente mediante el método de Simpson, tomando intervalos horarios y valores instantáneos. No nos extendemos más en este punto por estar recogido ampliamente en la bibliografía (Puig-Adam, 1965).

Los resultados obtenidos mediante el desarrollo anterior, dan origen a la obtención de la energía teórica recibida por una superficie horizontal (G_0) (Tabla 2).

El siguiente objetivo en el presente trabajo, fue proceder al cálculo de la energía solar real recibida en Salamanca, durante el período comprendido entre Enero de 1971 y Diciembre de 1977. (Tablas 3 y 4).

Para ello se utilizaron las bandas obtenidas por el actinómetro del departamento situado en el observatorio de Matacán; realizando mediciones con el planímetro antes citado, día a día y en intervalos de horas estimadas, procediendo a continuación a la obtención de valores promedios decenales, mensuales y anuales que aparecen en la tabla. Nótese que hemos obtenido y procesado más de 9.000 datos, y nos llena de satisfacción que éstos sean utilizados para la realización de otros trabajos de licenciatura en este departamento.

Tanto en la obtención de estos valores de radiación solar global (G), como en los obtenidos más adelante, hemos mantenido una constante preocupación en el empleo de unidades en el S.I., como de la simbología más recomendada y utilizada en este campo.

Posteriormente al cálculo de la R.S.G. (G), nos ha parecido interesante, referir estos datos a un parámetro, radiación potencial (G_p), que representa la energía que se recibiría bajo cielo despejado y composición atmosférica próxima a la normalidad (Tabla 3). Este valor, si bien ha sido objeto de amplios estudios por autores soviéticos y citado en las traducciones anglosajonas como «radiación máxima posible» (1971, Kondratyev, Y.K., *Loc. cit.*) aún no ha sido estudiado en nuestra zona.

Digamos que recientemente y con indudable acierto Oriol y Puigcervert (1974) denominan a esta variable como radiación potencial (G_p) y que consecuentemente utilizaremos en este trabajo.

La elección de los días representativos de esta radiación potencial (G_p), se efectuó considerando únicamente aquéllos totalmente despejados. La Figura 1 presenta la banda actinométrica de uno de estos días.

5. FUENTES DE ERROR

Vamos a efectuar, en este apartado, un somero análisis de los errores que se pudieran haber cometido. Consideremos en primer lugar los instrumentales, entre los que cabe destacar:

- La ausencia de elemento compensador de temperatura.
- El tiempo de respuesta; al ser elementos mecánicos presentan una mayor inercia a la respuesta.
- El error debido a la ley del coseno. Este error es común para cualquier tipo de piranómetros, y para ángulos cenitales inferiores a 10° puede llegar a ser importante.
- La no uniformidad en las curvas de sensibilidad superficial del elemento sensor.

Digamos, no obstante, que estos errores no suponen en modo alguno un serio problema, por cuanto estamos evaluando valores globales diarios.

No podríamos decir lo mismo en el caso de que nuestros estudios se enfocaran en el campo de la turbiedad atmosférica, que precisa valores instantáneos.

Además hemos tenido en cuenta el factor de corrección que facilita el fabricante, y que en este caso, para el Robitzsch empleado, es:

$$F = 0,743 - 6,41 \cdot 10^{-3} ho - 3,30 \cdot 10^{-5} ho^2$$

siendo:

$$ho = 90^{\circ} - \emptyset - \delta$$

donde:

\emptyset = Latitud geográfica

δ = Declinación aparente del sol

ho = Altura media meridiana del sol

F = Factor de corrección para ho

Estas correcciones se corresponden con las recomendadas por IPS 1956 (International Pirheliometric Scale).

Insistimos de nuevo en que somos conscientes de las limitaciones de este instrumento, que por su naturaleza y características no es comparable a los modernos piranómetros termoelectrónicos. No obstante hemos estimado su validez dada la naturaleza del trabajo en el que hacemos uso de valores totales diarios, y creemos que en este sentido, los registros del Robitzsch empleado son estimables y suficientemente válidos.

En cuanto al error que pudiera haberse cometido con el planímetro, es evidente que resulta difícilmente evaluable. No obstante nos hemos aproximado

al error personal cometido al plauemetrear las bandas; para ello hemos comparado los valores de la energía global (G_0) deducidos a partir de la ecuación [3], con los obtenidos al medir con el planímetro una representación de estos valores efectuada en papel milimetrado.

Este error oscila entre 9,6 % y 3 %, siendo su valor promedio 7,9 %.

3. VARIABLES Y RELACIONES PROPUESTAS

1. VARIABLES

Las variables empleadas en la realización de este trabajo han sido fundamentalmente tres: la radiación solar **global** (G), la radiación solar global máxima o **teórica**, referida al límite de la atmósfera (G_0), y la radiación recibida en días completamente despejados, que denominamos **potencial** (G_p); por ello hemos pensado en la conveniencia de hacer una breve exposición de los mismos.

El estudio sistemático de la radiación solar global (G), que comprende el espectro entre 300-3000 nm y supone aproximadamente el 97,5 % de la energía total recibida, nos lleva a considerar sus distintas componentes: La radiación directa y la radiación difusa.

La radiación solar **directa** I , es la componente de la radiación solar en un plano normal a los rayos del sol. Su evaluación teórica en el límite de la atmósfera, donde no ha sido modificada por los diferentes agentes atmosféricos, se realiza a partir de la constante solar I_0 y de la distancia media tierra-sol, distancia a la que se denomina radio vector medio S_0 , definidos ambos en la Introducción de este trabajo.

La evaluación real se efectúa en la superficie terrestre y por tanto debemos tener en cuenta, los factores atmosféricos que sobre ella influyen.

En ausencia de capa nubosa, la atenuación de la energía solar incidente se debe fundamentalmente a las tres causas siguientes:

- a) A la difusión por las moléculas de aire, así como por todas las partículas de dimensiones inferiores a la longitud de onda λ que se considera. Este efecto de difusión molecular,

también llamado efecto Rayleigh, es proporcional al inverso de la cuarta potencia de la longitud de onda.

- b) A la difusión y reflexión por partículas aerosoles presentes en la atmósfera.
- c) A la absorción selectiva por diferentes componentes gaseosos, especialmente el ozono, vapor de agua, oxígeno, etc.

La ley fundamental de extinción de la radiación fue enunciada por Beer o Bouger-Lambert (según la nacionalidad de los autores que se considere), y se puede expresar:

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} e^{-t m}$$

donde I_{λ} es la radiación directa recibida en la superficie de la tierra correspondiente a la longitud de onda; $I_{0\lambda}$ es el valor de la radiación en el límite atmosférico, m es la masa óptica relativa al aire y t es el coeficiente espectral de extinción global.

La radiación **difusa** es la componente de la radiación solar global que se considera como suma de la radiación difundida por las moléculas de aire, de acuerdo con la teoría de Rayleigh, así como de la procedente de los aerosoles y las nubes, siguiendo ésta la teoría de Mie, 1907, *loc. cit.* Kondratyev, Y.K., 1969.

La difusión de una radiación de longitud de onda λ por partículas aerosoles de tipo esférico y diámetro d , depende esencialmente del orden de magnitud del cociente d/λ ; para el cálculo de la difusión por aerosoles, sólo una teoría basada en las ecuaciones de Maxwell puede considerarse precisa, Mateos, J., 1976.

La gran diferencia que existe entre la radiación difusa recibida en un día despejado y en uno nublado nos obliga a considerar separadamente ambos casos.

- a) En un día despejado los factores que afectan a la componente difusa son: la altura solar, la turbiedad atmosférica y el albedo de la superficie.
- b) En días nublados y aparte de los factores antes mencionados influyen otros más complejos de parametrizar, así el tipo, la altura y la temperatura de las nubes son factores decisivos.

La radiación solar global (G), se define pues como la suma de los componentes directa y difusa de la radiación, por lo que vendrá dada por la expresión:

$$G = I \text{ sen } h + D$$

donde:

h es la altura solar

Es en definitiva la radiación solar global la que aporta la casi totalidad de la energía recibida por la tierra, tanto en forma directa, como a través de procesos superficiales o atmosféricos.

Se ha calculado que la tierra, distante del sol unos 150 millones de Km., recibe $1,7 \cdot 10^{14}$ Kw., lo cual es una cantidad despreciable ($5 \cdot 10^{-10}$) de la energía que realmente produce el sol; esta fuente de energía es muy superior a todas las demás juntas (unas 5.000 veces) y 167.000 veces mayor que la que ahora se consume en el mundo.

Hemos de lamentar la escasez de medidas de esta radiación en España, a pesar de ser fácilmente medible por diversos instrumentos, entre los que cabe destacar los actinógrafos; siendo una variable que nos puede informar sobre el comportamiento de la atmósfera.

Otro aspecto de este trabajo ha sido la obtención y estudio de la radiación recibida en el límite de la atmósfera denominada radiación solar máxima o radiación extraterrestre (G_0); que expresa la energía recibida por una superficie horizontal situada en el límite de la atmósfera, en el período de tiempo y latitud considerados.

Los valores de este parámetro utilizados para el presente trabajo han sido obtenidos teniendo en cuenta que la radiación global y por unidad de tiempo y que alcanza el límite de la atmósfera, es directamente proporcional a la constante solar (I_0), al coseno de la altura solar, e inversamente proporcional al radio vector (S), según se propone en la relación [1], y en donde realizando las oportunas transformaciones y aproximaciones citadas en la Introducción, se obtienen los resultados expresados en la Tabla 2.

Debemos hacer constar, que si bien los valores de G_0 , han sido calculados de la forma antes citada, su cálculo es accesible haciendo uso de las tablas dadas por Robinson, N. (1966), aunque los valores que proponen son mensuales, para latitudes entre 40° y 50° y tendríamos que haber calculado primeramente la radiación extraterrestre mensual para la latitud de nuestro observatorio, y los valores decenales mediante una interpolación lineal a partir de fórmulas expuestas en la bibliografía relativa al tema.

La tercera variable estudiada ha sido la energía radiativa que se recibiría bajo cielo despejado y condiciones atmosféricas próximas a la normalidad, considerando como tal la ausencia de hidrometeoros, que denominaremos radiación potencial (G_p).

El cálculo de esta variable presenta dos problemas fundamentalmente, el primero se refiere a la necesidad de disponer de una larga serie de datos experimentales, para que los valores que se obtengan sean representativos. En segundo lugar el criterio seguido para la elección de los días válidos.

Análogamente a la radiación solar global teórica (G_0), podríamos haber obtenido los valores de la radiación potencial (G_p), extrapolando de los obtenidos por Berlyand y Danilchenko, 1961, recopilados por Kondratyev, Y.K., 1969.

Sin embargo, nos ha parecido más correcto, al disponer de una serie suficientemente extensa de datos locales diarios, efectuar el cálculo de la radiación potencial a partir de los mismos, por considerar que los valores de G_p , obtenidos de forma semiempírica por Berlyand y Danilchenko, introducen diversas aproximaciones no siempre correctas principalmente en cuanto a la proporción de los componentes atmosféricos estudiados. Puesto que los valores tabulados de G_p han sido utilizados en otros trabajos del departamento Mateos, J. 1979. Es interesante relacionarlos con los obtenidos experimentalmente. La recta de regresión obtenida entre ambas variables es:

$$G_{p \text{ real}} = 2,78 + 0,75 G_p \text{ tab}$$

$$r = 1.00$$

En valores promedios vemos que la experimental es tan sólo el 87,10 % de la tabulada, lo que confirma el comentario antes hecho.

Tras su análisis, representamos gráficamente estas variables en los intervalos de tiempo elegidos (Figuras 2, 3 y 4); la observación de éstos arroja una valiosa información que se comentará en apartados siguientes al analizar los resultados.

FIGURA 2
EVOLUCION ANUAL DE LAS VARIABLES

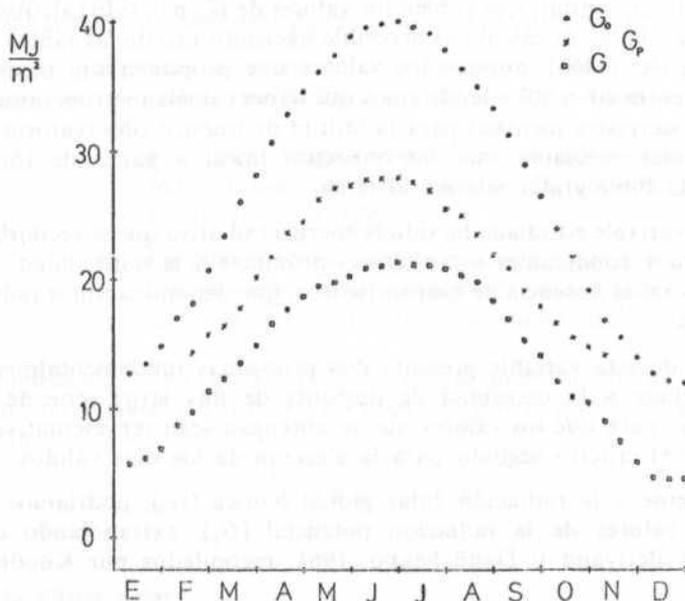
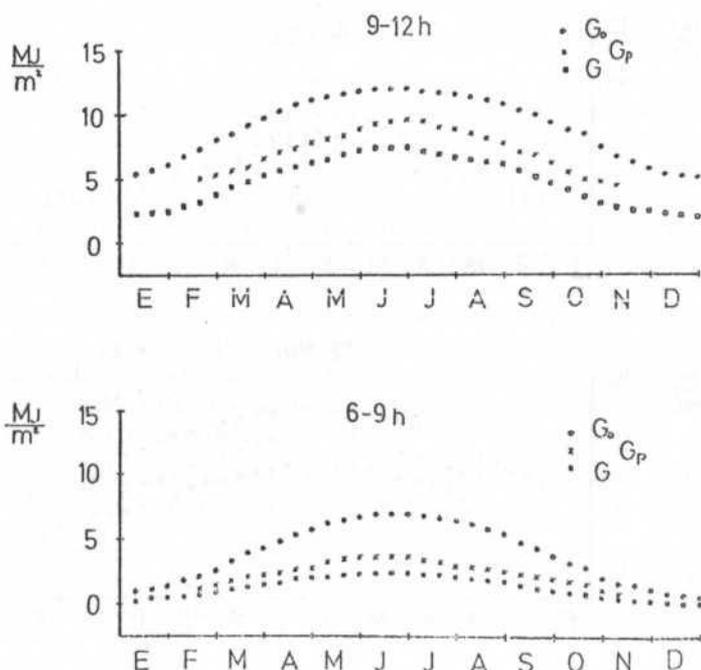


FIGURA 3
EVOLUCION ANUAL DE LAS VARIABLES



2. RELACIONES PROPUESTAS

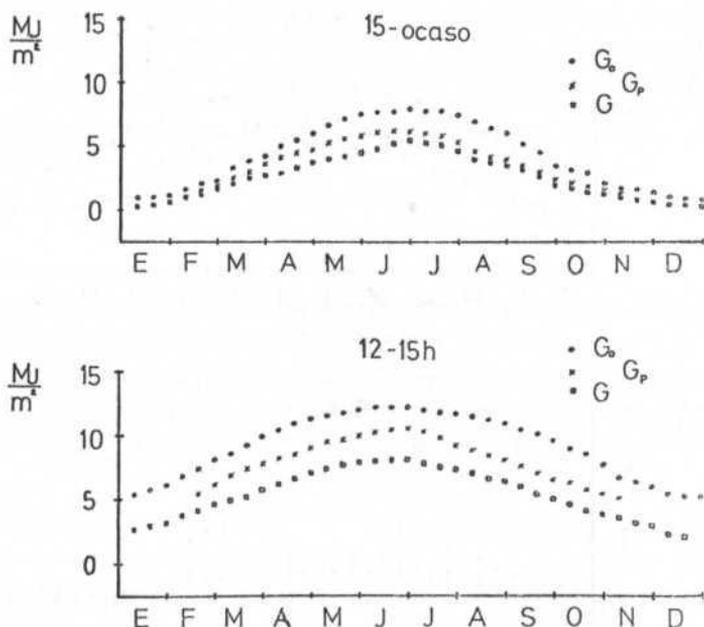
El siguiente paso en nuestro estudio, ha sido el obtener una serie de relaciones que puedan servir para completar el análisis de las radiaciones estudiadas.

La primera de estas relaciones es la obtenida entre la radiación solar global que se recibe y la teórica o extraterrestre (G/G_0), Tabla 6.

Esta relación está ampliamente estudiada en la bibliografía, y existen gran número de ecuaciones para su cálculo, que podemos clasificar en dos grupos según su objetivo:

- Ecuaciones encaminadas a la evaluación de la radiación global, (G); a partir de otras variables como son: la insolación, nubosidad..., etc. Este tipo de ecuaciones son

FIGURA 4



llamadas por algunos autores «fórmulas de tipo Angström», Perrin de Brichambaud, 1963; estas ecuaciones son de tipo:

$$G/G_0 = a + bx$$

donde: x representa la variable considerada y los coeficientes a y b son parámetros de tipo local.

Este tipo de ecuaciones, si bien gozan de gran aceptación, van perdiendo vigencia por la paulatina profusión de las medidas directas de radiación solar global.

- b) En un segundo grupo menos estudiado que el anterior, encuadramos aquellas expresiones donde se suele utilizar el cociente (G/G_0) , para estimar la transparencia atmosférica en la radiación solar global; las variables utilizadas son las mismas aunque ligadas de una forma más compleja, Mateos, J., 1980.

De forma general el cociente (G/G_0), viene definido en función de un coeficiente de atenuación K , suma de los correspondientes a la difusión y absorción principalmente.

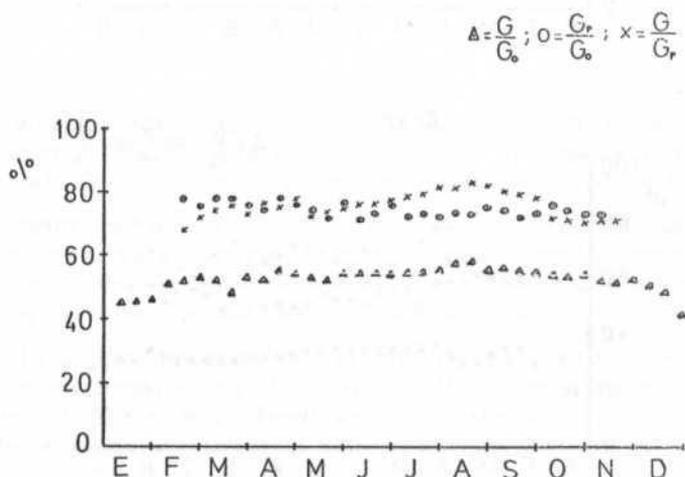
La segunda relación estudiada ha sido la existente entre la radiación potencial y la radiación solar global teórica: (G_p/G_0), Tabla 7.

Hemos definido la radiación potencial como la energía recibida en días completamente despejados; y la radiación solar teórica, como la que se recibiría en una superficie horizontal colocada en el límite de la atmósfera; es decir, sin tener en cuenta la capa atmosférica que existe entre los dos puntos considerados. Podemos deducir de estas dos definiciones que la relación estudiada nos da una idea, sobre la atenuación de la energía radiativa, para la zona de Salamanca, que se produce en la capa gaseosa existente entre el límite de la atmósfera y el lugar donde situamos el instrumento de medida de la radiación. Este factor debe de ser inferior cuantitativamente al obtenido mediante la relación (G/G_0); ya que es patente que G_p debe ser numéricamente mayor que G , al representar éste, la energía radiativa recibida en condiciones atmosféricas cualesquiera; y siendo el primero la energía solar recibida en ausencia de cualquier hidrometeoro que pudiera perturbar la atmósfera.

Por último hemos estudiado la relación (G/G_p), entre la radiación solar global y la radiación potencial (Tabla 8).

Haciendo un estudio sobre el significado teórico de las variables que forman esta relación, observamos que la diferencia existente entre las dos energías radiativas, viene determinada por la presencia de hidrometeoros (nubes, lluvia,

FIGURA 5
EVOLUCION ANUAL DE LAS RELACIONES



granizo, etc...), en la obtención de la energía solar global, y la ausencia de éstos en la evaluación de la energía solar para días completamente despejados (Radiación potencial). Podemos afirmar que la relación estudiada, es un índice de atenuación de la radiación solar, producido por la aparición de hidrometeoros en la atmósfera.

Por tanto, y sin entrar en un análisis de resultados que se efectuará más adelante; podemos, comparando las relaciones propuestas, sostener que dichos cocientes representan factores de atenuación o disipación de la energía radiante recibida en las proximidades de Salamanca (Figura 5, 6 y 7).

El primero de ellos (G/G_0), nos indica la atenuación producida tanto por los hidrometeoros y factores climatológicos, como por la existencia de una capa gaseosa atmosférica, existente entre los niveles de medición de energía solar considerados.

FIGURA 6
EVOLUCION ANUAL DE LAS RELACIONES

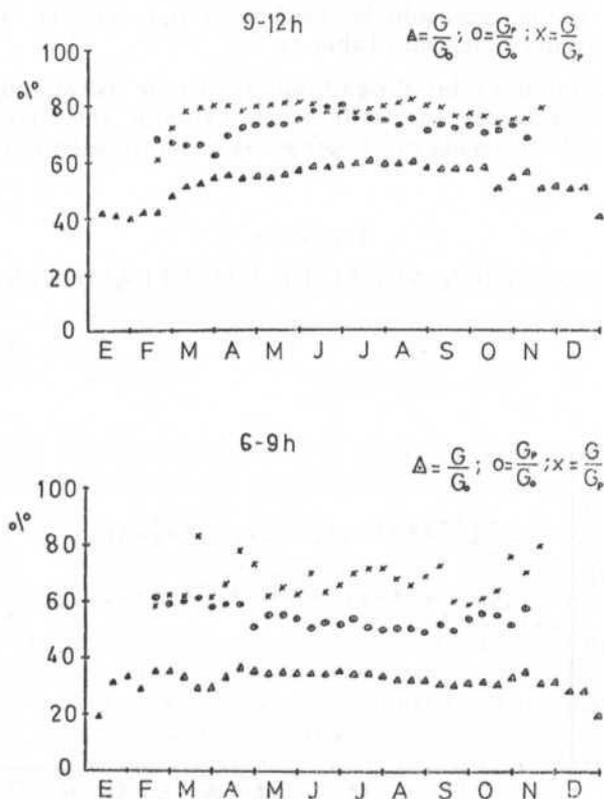
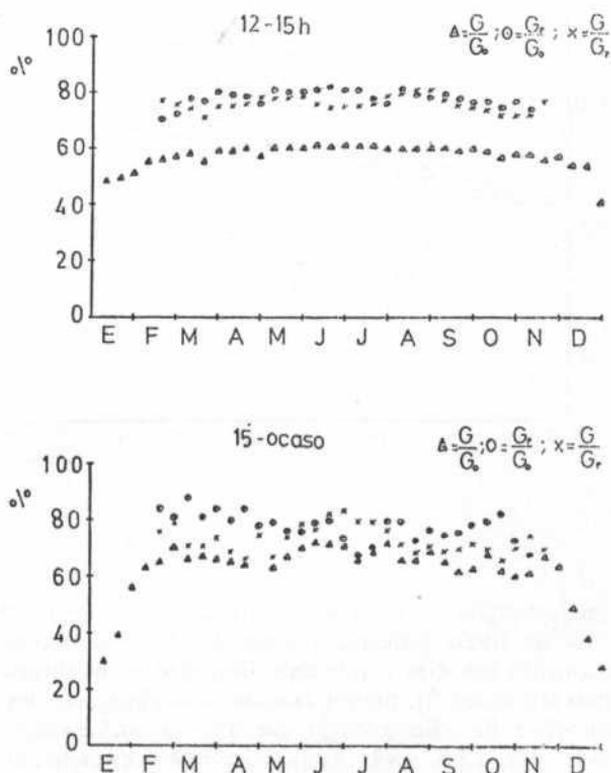


FIGURA 7
EVOLUCION ANUAL DE LAS RELACIONES

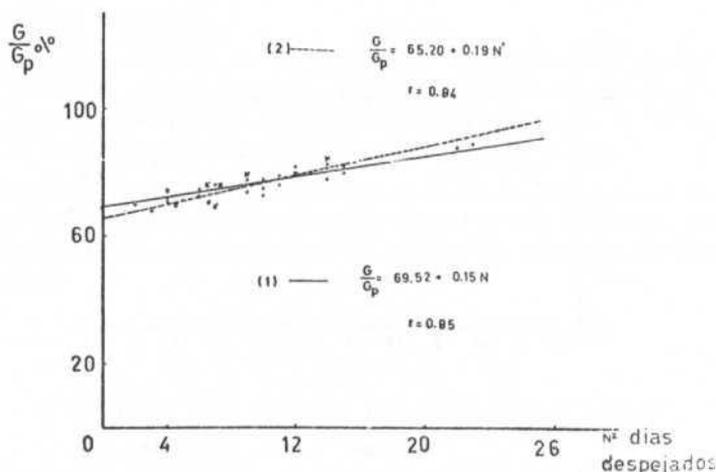


La segunda relación (G_p/G_0), estima la disminución de radiación producida exclusivamente por la superficie atmosférica que rodea nuestro planeta, considerando la no existencia de factores de perturbación en la misma.

Finalmente, la última expresión estudiada (G/G_p) da una idea de la disipación de energía producida por la presencia de elementos meteorológicos en la capa atmosférica; lo que se obtiene analizando tanto los días completamente despejados como en los que existen dichos factores.

A partir de las consideraciones teóricas de este cociente, parece claro que podríamos relacionarlo con el número de días despejados; gráficamente nos remitimos a la Figura 8, en donde aparece en abscisas el número de días y en ordenadas el cociente porcentual entre la energía solar global y la radiación potencial.

FIGURA 8
EVOLUCION ANUAL DE LAS RELACIONES



En dicha representación podemos apreciar que aparecen dos rectas representadas. La de trazo continuo (ecuación 1), es la obtenida cuando N representa únicamente los días totalmente despejados; mientras que en la de trazo discontinuo (ecuación 2), hemos considerado para días despejados N' , el criterio internacional de climatología de que la nubosidad suma de las observaciones a las 7 h., 13 h., 18 h., sea a lo sumo $4/8$ de cielo cubierto. De esta forma los casos superiores extremos podrían ser:

4,0,0/8

3,1,0/8

2,2,0/8

2,1,1/8

distribuidos en las distintas observaciones.

Los puntos obtenidos, tratados mediante el método de los mínimos cuadrados, conducen a las ecuaciones que expusimos más arriba.

Estimamos que estas ecuaciones, a pesar de su sencillez, pudieran ser aplicables a otras zonas de nuestro país, sin más que tener en cuenta los factores de corrección pertinentes, lo que supondría la posibilidad del cálculo del factor de atenuación de la energía radiativa, producido por los meteoros.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

1. EVOLUCION DE LAS VARIABLES G , G_0 , y G_p EN EL PERIODO ESTUDIADO

Pasamos en este apartado a interpretar las medidas que hemos utilizado en el trabajo. A fin de ver la evolución de los promedios, hemos realizado una representación gráfica de las variables, para cada uno de los intervalos considerados, obteniendo las Figuras 2, 3 y 4.

Se han seguido con todo rigor las normas internacionales que refleja la bibliografía, a fin de facilitar la comparabilidad de los resultados. En consecuencia se han obtenido valores medios decenales a partir de los diarios, de las variables consideradas; para conservar los promedios mensuales, todavía muy usados, se escogieron las decenas de la forma siguiente:

- 1a. decena: días del 1 al 10
- 2a. decena: días del 11 al 20
- 3a. decena: días del 21 hasta el fin de mes

En las tres curvas, puede observarse que el máximo absoluto corresponde a segunda y tercera decena de junio, próximas al solsticio de verano, donde también existe un máximo de radiación extraterrestre.

El mínimo absoluto se encuentra en las decenas segunda y tercera de Diciembre, en el solsticio de invierno. Estos valores aparecen en la Tabla 9. Los valores de esta tabla se expresan en MJ/m².

Un estudio global de las curvas promediadas decenal y anualmente, permite afirmar que la evolución radiativa presenta pocas fluctuaciones, se observa un

TABLA 9
LOS VALORES DE ESTA TABLA SE EXPRESAN MJ/m²

		6-9 h.	9-12 h.	12-15 h.	15-Ocaso	T
G_0	Máx.	6,99	12,09	12,09	8,32	39,85
	Mín.	0,81	5,27	5,27	0,80	12,17
G_p	Máx.	3,70	9,66	10,50	6,13	27,85
	Mín.	0,42	4,20	4,24	0,69	11,38
G	Máx.	2,42	7,51	7,91	5,51	21,67
	Mín.	0,15	1,62	2,18	0,25	4,62

ascenso poco pronunciado de Enero a Marzo; tiene un ascenso mayor y ligeramente distorsionado durante los meses de Abril y Mayo, hasta llegar lentamente al mes de Junio en donde se alcanza, como cabría esperar el valor máximo anual; ello es lógico al pensar en los valores que presenta la declinación a lo largo del año.

Las otras dos curvas representativas de G y G_p , si bien siguen una tendencia análoga a la anterior, presentan la particularidad de que en general la pendiente del segundo semestre supera, aunque muy débilmente, a la del primero.

También hemos de destacar que, como se aprecia, los promedios de las tres decenas del mes de Diciembre son prácticamente iguales, debido en gran parte a la intensa presencia de hidrometeoros en especial la niebla, así como las bajas temperaturas que afectan a la inercia del aparato.

Si analizamos las gráficas atendiendo a los intervalos horarios, de 06.00 a 09.00 horas y de 15.00 al ocaso, vemos que existe gran proximidad entre las curvas representativas de la radiación solar global (G) y la radiación potencial (G_p), al tiempo que se advierte que el tramo ascendente es algo más irregular que el descendente; esta posible anomalía se aprecia perfectamente en los datos expuestos en el apéndice (Tabla 4).

Por lo que se refiere a los períodos de tiempo comprendidos entre 09.00-12.00 horas y 12.00-15.00 h. se ve claramente un mayor distanciamiento entre las curvas de G y G_p .

En las dos clases de intervalos, se observa además que los valores correspondientes a los extremos horarios, presentan una mayor linealidad, a lo largo del año, que la de los intervalos centrales del día.

Hay que hacer notar que en la representación de la radiación potencial (G_p), faltan los valores decenales de Enero y Diciembre; ello es debido a que en estos meses los días completamente despejados son escasos y por tanto no podríamos obtener un valor representativo; aspecto éste que ha sido una constante para nosotros en la realización del trabajo.

2. EVOLUCION DECENAL Y MENSUAL DE LAS RELACIONES PROPUESTAS (G/G_0) (G_p/G_0) (G/G_p)

Hemos presentado en las Figuras 5, 6 y 7 la evolución anual de los promedios decenales, en tanto por ciento, de las relaciones propuestas, en los intervalos considerados.

Para la primera de las relaciones (G/G_0), se observa que presenta un gran paralelismo y linealidad en los cuatro períodos estudiados, si bien presenta descensos irregulares en los primeros y últimos meses del año, que son atribuibles a características de la evolución radiativa anual.

Recordemos que este cociente representa una primera aproximación muy primaria, de lo que pudiéramos denominar transparencia atmosférica, si bien y con todo rigor, este término debe reservarse a estudios en los que se hace uso de la componente directa de la radiación solar I .

Observamos una gran fluctuación de valores, en los períodos 06.00-09.00 y 15.00-ocaso, debido a diversas causas entre las que cabe destacar: la influencia

TABLA 10
VALORES EXTREMOS DE LAS RELACIONES EN LOS INTERVALOS HORARIOS

		6-9 h.	9-12 h.	12-15 h.	15-Ocaso	T
G/G_0 (%)	Máx.	34,6	58,5	61,2	41,5	57,7
	Mín.	19,1	40,7	46,4	23,1	40,9
G_p/G_0 (%)	Máx.	60,9	80,0	80,8	71,9	78,5
	Mín.	51,9	68,5	74,3	68,1	71,7
G/G_p (%)	Máx.	66,2	77,8	75,4	73,2	76,5
	Mín.	48,2	61,4	71,7	69,5	70,1

del ángulo cenital en el actinógrafo, la inercia de éste, así como su tiempo de respuesta.

En definitiva, de esta relación se extrae una valiosa información como es el conocimiento de la energía real que se recibe en Salamanca; en promedio representa el 51,7 % de la energía que se recibe en el límite de la atmósfera. Lo que supone 5544,8 MJ/m² anualmente.

En la Tabla 10 se amplían estos porcentajes para los distintos intervalos.

Respecto de las otras dos relaciones estudiadas observamos que son curvas anárquicas como corresponde a los fenómenos que les afectan; vemos que existen diferencias muy notables entre los distintos períodos de tiempo analizados, si bien podemos decir que existen mínimos relativos en los meses de Abril y Septiembre con valores del 73,2 %; presentando los máximos relativos en los meses de Junio y Agosto. De esta forma vemos que en días despejados totalmente se recibe un 74,5 % de la radiación teórica.

Observamos que, análogamente a lo expuesto para la primera de las relaciones, existen ascensos y descensos irregulares debidos a motivos expuestos anteriormente.

Como hacíamos referencia en el apartado anterior, hemos planteado una ecuación lineal entre el cociente (G/G_p) y el número mensual de días despejados N ; las ecuaciones obtenidas son:

$$G/G_p = 69,52 + 0,15 N \quad r = 0,85 \quad [1]$$

$$G/G_p = 69,20 + 0,19 N \quad r = 0,84 \quad [2]$$

vemos que a pesar de la sencillez de la variable utilizada, los coeficientes de correlación son bastante aceptables.

Hemos estudiado las diferencias más acusadas existentes y creemos que son atribuibles a evoluciones anuales peculiares apareciendo fluctuaciones bastante acusadas en los meses y años que a continuación se detallan.

- Enero y Abril de 1971, con un 20,9 % y 52,7 % de energía solar menor que la media obtenida.
- Febrero, Marzo y Julio de 1972, con un 35,5 %, 37,3 % y 33,1 % inferior a la media.
- Septiembre de 1973, con el 16,4 % de más sobre el promedio.
- Febrero, Abril y Agosto de 1976, con el 19,6 %, 54,1 % por encima y el 25,3 % inferior a la media obtenida; fácilmente podemos ver estas anomalías en las Figuras 9 y 10.

FIGURA 9
EVOLUCION ANUAL DE LAS RELACIONES

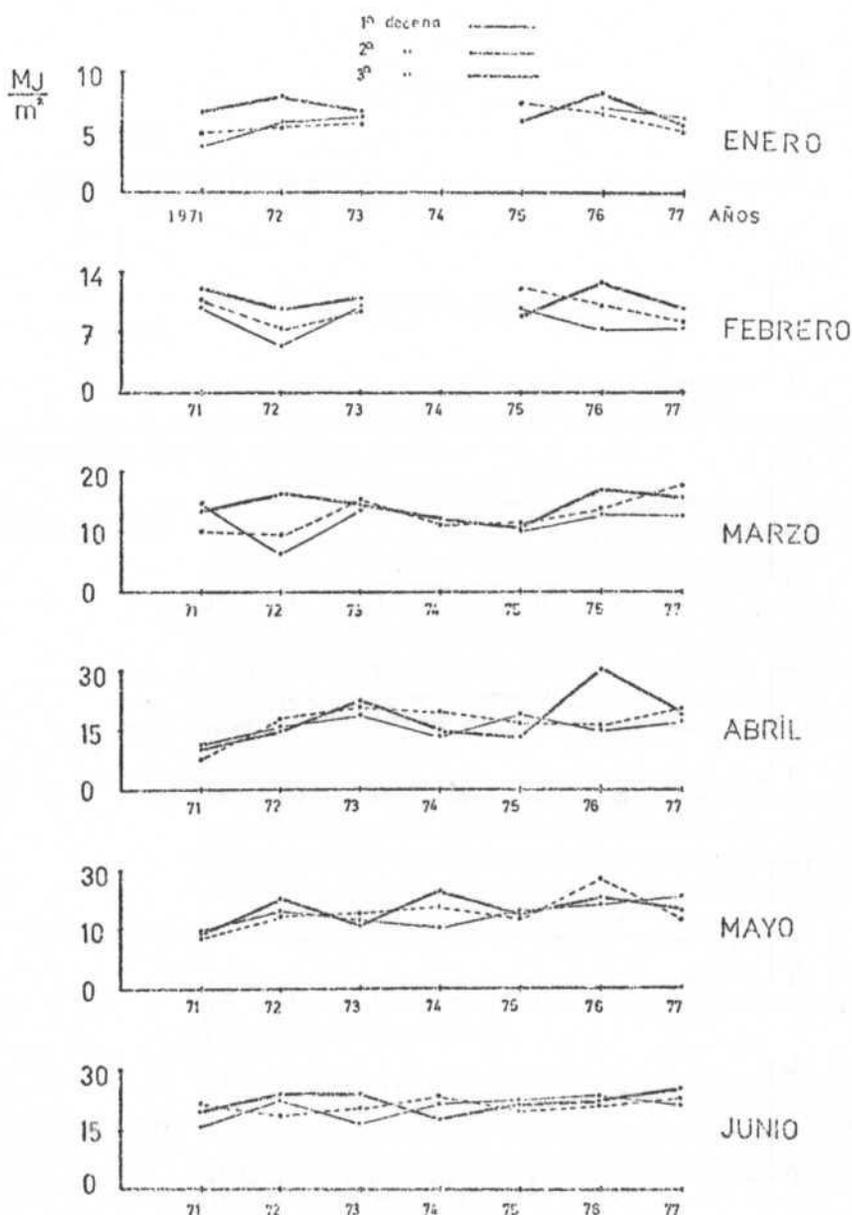
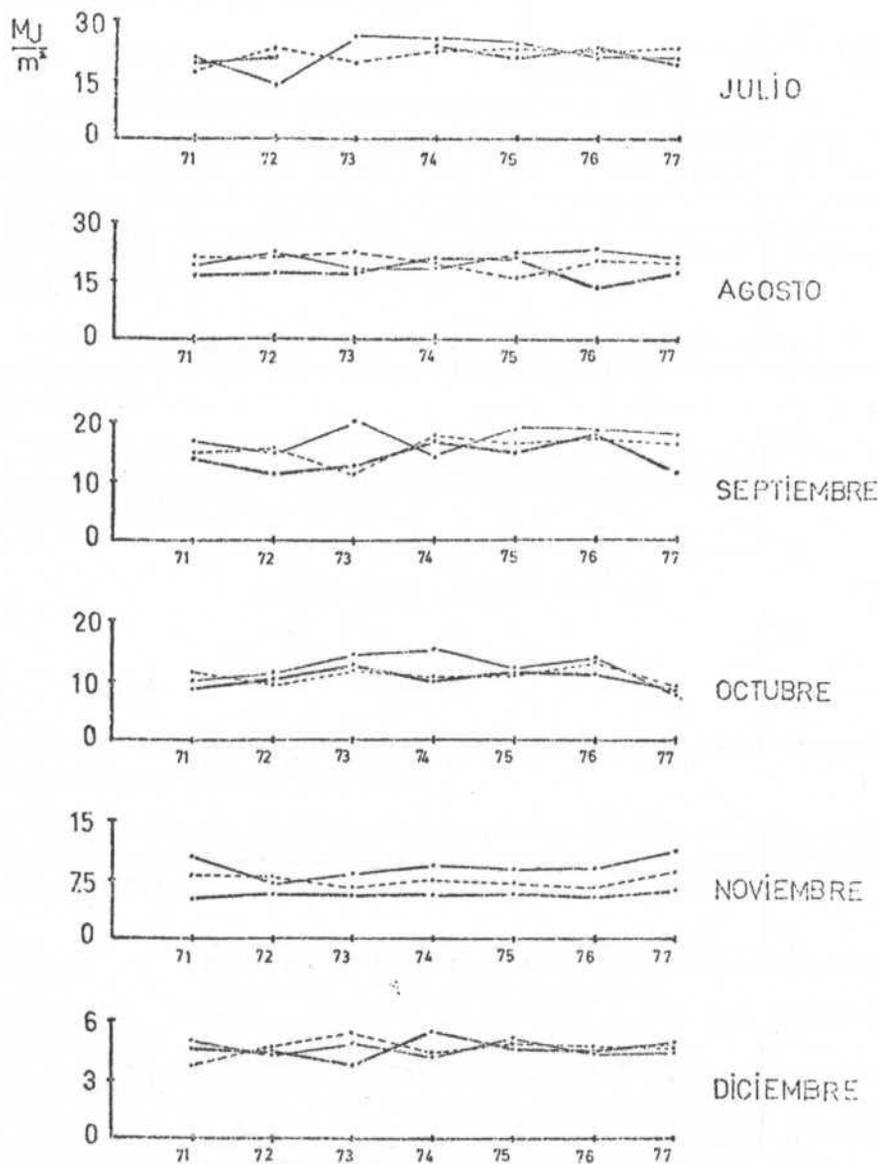


FIGURA 10
EVOLUCION ANUAL DE LAS RELACIONES



5. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de este trabajo, podemos destacar los siguientes puntos:

- 1) Se ha calculado teóricamente, haciendo uso de la ecuación [3] los valores interhorarios y diarios de la radiación solar global en el límite de la atmósfera (G_0) (Tabla 2).
- 2) Se han medido y representado por primera vez para la zona de Salamanca, la evolución de la radiación solar global (G), y la radiación potencial (G_p) en el período de tiempo comprendido entre Enero de 1971 y Diciembre de 1977 (Tablas 2, 4 y 5); para ello nos hemos servido de registros actinométricos.
- 3) Hemos obtenido los valores de radiación para días completamente despejados, que denominamos radiación potencial (G_p); estos valores se han contrastado con los tabulados por Berlyand y Danilchenko; la recta de regresión obtenida es:

$$G_{p \text{ real}} = 2,78 + 0,75 G_{p \text{ tab.}} \quad r = 1,00$$

En valores promedio vemos que la experimental es tan sólo el 87,10 % de la tabulada.

- 4) Se han efectuado relaciones entre la radiación solar global (G), la radiación potencial (G_p) y la radiación solar global teórica (G_0), obteniendo unos índices de atenuación tanto de la capa gaseosa como de la mayor o menor incidencia de los hidrometeoros (Tablas 6, 7 y 8).

- 5) Hemos tabulado tanto los valores de radiación G , G_0 , G_p , en el período de tiempo considerado, así como las relaciones propuestas G/G_0 , G_p/G_0 y G/G_p .
- 6) La relación entre la radiación solar global (G) recibida, y la que se recibe en el límite atmosférico de igual latitud (G_0), presenta fluctuaciones, si bien su tendencia muestra una constancia a lo largo del año; exceptuando el comienzo y final del mismo.

En valor promedio hemos encontrado que en Salamanca se recibe tan sólo el 51,7 % de la que teóricamente llega al límite de la atmósfera.

- 7) El cociente entre la radiación potencial (G_p) y la recibida en el límite atmosférico (G_0) varía durante el año, obteniéndose mínimos relativos en Abril y Septiembre y máximos en Junio y Agosto. En valor promedio representa un 74,5 % de G_0 .
- 8) El índice de atenuación producido por la existencia de hidrometeoros, caracterizado por el cociente entre la radiación solar global (G) y la radiación potencial (G_p), presenta valores irregulares que impiden efectuar consideraciones suficientemente estimativas, si bien la incidencia media se cifra en un 75,7 %.
- 9) Finalmente, destacar que hemos procurado en todo momento aportar unos resultados que permitan abordar futuras y más concretas investigaciones.
- 10) Digamos también, que dado el gran número de datos que se han procesado para el trabajo (unos 18.000), no creemos necesaria la transcripción íntegra de éstos en los apéndices, que reflejan por su parte los más representativos. En todo caso, se encuentran en el departamento a disposición de cualquier organismo que lo solicite.

6. BIBLIOGRAFIA

- ABERNATHY, R.S.: *Effects Biologiques de la lumiere solaire*, Amer. J. Dis. Chil., 101,6, 784-798 (1961).
- ANGSTROM, A.: *Techniques of determining the turbidity of the atmosphere*, Tellus, 13,2, 214-223 (1961). *The parameters of atmospheric turbidity*, Tellus, 16,1, 64-75 (1964). *Circumsolar sky radiation and turbidity*, Appl. Opt. 13,3, 474-477 (1974).
- BACH, W.: *Solar irradiation and atmospheric pollution*, Arch. Meteorol Geoph. Biokl., 21, 66-75 (1973).
- B. DE JONG: *Net radiation received by a horizontal surface at the earth*, Delft University Press (1973).
- BERTOYE, A.: *Meteoropathologie*, Encid. Medico-Chirurgicale, vol. 2 (1964).
- BUDYKO, M.J.: *Effect of solar variation on climate of the earth*, Tellus, 21, 611 (1966).
- COLLIER, R.L. Y LOCKWOOD, G.: *The estimation of solar radiation under cloudless skies with atmospheric dust*, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 100, 426 (1974).
- COULSON, L.K.: *Solar and terrestrial radiation: Methods and Measurements*, Academic Press, New York (1975).
- DOGNIAUX, R. Y DOYEN, P.: *Statistical analysis of turbidity from 15 years radiometric observations in Belgium*, W.M.O. n^o 248, T.P., 136, 187 (1970).
- DRUMMOND, A.J.: *A survey of the important developments in thermal Radiometry*, Adv. in Geoph. vol. 14, Acad. Press (1970).
- EGIDO, M., SECO, J. Y GARMENDIA, J.: *Desfases entre radiación e insolación*, An. de Edaf. y Agrobiol., 32, 11-12 (1973).
- FISCHER, K.: *Mass absorption coefficient of natural aerosol particles in the 0,4-2,4 nm. wavelength interval.*, Beiträge zur Physik der Atmosphäre, 4 (1973).

- FLOWERS, C.E., McCORMICK, A.R.: *Atmospheric turbidity over U.S.A., 1961-66*, J. Appl. Meteorol., 8, 955-962 (1969).
- FUJIMOTO, I.: *Influence of atmospheric pollution on the solar radiation measured on the ground*, Geoph. Mag., 37, 1-48 (1974).
- FUCHS, A.N.: *The mechanics of aerosol*, Pergamon Press, New York (1964).
- GALINDO, I.G.: *Estudio de la radiación solar durante el año geofísico internacional*, Monograf. Inst. Geog., México (1960).
- GARMENDIA, J.: *Datos y notas sobre el clima de Matacán (Salamanca)*, S M N, Serie A, nº 29 (1957).
- GEIGER, R.: *The climate near the ground*, Harvard, University Press (1965).
- GOODY, R.M.: *Atmospheric radiation, I, Theoretical Bases*, Oxford, University Press (1964).
- GRASSL, M.: *Aerosol influence in radiative cooling*, Tellus, 25,4, 386-395 (1973).
- IDSO, S.B.: *Atmospheric attenuation of solar radiation*, J. Atmos. Sci., 26, 1088-1095 (1969).
- KONDRATYEV, Y.K.: *Radiation in the atmosphere*, Academic Press, New York (1969).
- LJST, R.J.: *Smithsonian Meteorological Tables*, Smithsonian Inst. Press, Washington D.C. (1949).
- MATEOS, J., RODRIGUEZ, C. Y GARMENDIA, J.: *La humedad relativa como variable para caracterizar la opacidad atmosférica*, Rev. de Geof. 1,2, 231-244 (1978).
- MOLLER, F.: *Meteorological challenges; A History*, Ed. D.P. McIntyre Part., p. 43 (1972).
- ORIOI, E. Y PUIGCERVERT, M.: *Algunos aspectos de la radiación solar en el observatorio del Ebro (Tortosa)*, Vrania 281-282 (1975).
- PERRIN DE BRICHAMBAUD, CH.: *Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels*, Gauthier - Villards, París (1963).
- PUIG ADAM, P.: *Fundamento de geometría métrica*, Biblioteca Matemática, Madrid (1965).
- ROBINSON, N.: *Solar Radiation*, Elsevier, Pv. Co. London (1966).
- STERN, C.A.: *Air Pollution and its effects*, Academic Press, New York (1968).
- THEKAEKARA, M.P.: *Solar energy outside the earth's atmosphere*, Solar Energy, 14, 109-121 (1973).
- VOLZ, E.F.: *Some results of turbidity networks*, Tellus XXI, 625 (1969).
- W.M.O.: *Observation and measurement of atmospheric pollution*, W.M.O. nº 368 (1974).

APENDICE

TABLA I
DECLINACION SOLAR (δ) Y RADIO VECTOR (S)
(Promedio decenal)

MES	DECENA	δ	S
Enero	1a.	—22° 42'	0,9833
	2a.	—21° 16'	0,9837
	3a.	—19° 09'	0,9845
Febrero	1a.	—16° 10'	0,9859
	2a.	—12° 56'	0,9890
	3a.	— 9° 23'	0,9895
Marzo	1a.	— 6° 21'	0,9918
	2a.	— 2° 27'	0,9945
	3a.	1° 30'	0,9973
Abril	1a.	5° 46'	1,0004
	2a.	9° 29'	1,0028
	3a.	12° 56'	1,0060
Mayo	1a.	16° 02'	1,0085
	2a.	18° 40'	1,0108
	3a.	20° 49'	1,0129
Junio	1a.	22° 28'	1,0146
	2a.	23° 16'	1,0157
	3a.	23° 25'	1,0164
Julio	1a.	22° 52'	1,0166
	2a.	21° 39'	1,0163
	3a.	19° 51'	1,0157
Agosto	1a.	17° 12'	1,0144
	2a.	14° 18'	1,0127
	3a.	11° 02'	1,0107
Septiembre	1a.	7° 07'	1,0082
	2a.	3° 20'	1,0055
	3a.	— 0° 32'	1,0023
Octubre	1a.	— 4° 26'	1,0000
	2a.	— 8° 14'	0,9971
	3a.	—11° 50'	0,9943
Noviembre	1a.	—15° 27'	0,9915
	2a.	—18° 17'	0,9892
	3a.	—20° 36'	0,9870
Diciembre	1a.	—22° 16'	0,9854
	2a.	—23° 13'	0,9843
	3a.	—23° 25'	0,9834

TABLA 2
RADIACION SOLAR GLOBAL TEORICA
(G_0 en MJ/m^2)

MES	DECENA	Hora/TSV				
		6-9 h.	9-12 h.	12-15 h.	15-Ocaso	T
Enero	1a.	0,88	5,43	5,43	0,88	12,63
	2a.	1,02	5,74	5,74	0,92	13,54
	3a.	1,22	6,19	6,19	1,09	14,83
Febrero	1a.	1,77	6,80	6,80	1,72	17,14
	2a.	2,01	7,42	7,42	2,06	18,85
	3a.	2,47	8,11	8,11	2,26	21,17
Marzo	1a.	3,17	8,63	8,63	3,45	23,60
	2a.	3,73	9,27	9,27	3,82	26,01
	3a.	4,12	9,87	9,87	4,28	28,00
Abril	1a.	4,77	10,45	10,45	5,08	30,50
	2a.	5,30	10,91	10,91	5,46	32,73
	3a.	5,77	11,27	11,27	6,05	34,59
Mayo	1a.	6,16	11,57	11,57	6,64	36,06
	2a.	6,49	11,78	11,78	7,14	37,38
	3a.	6,72	11,94	11,94	7,56	38,71
Junio	1a.	6,90	12,04	12,04	7,64	39,48
	2a.	6,98	12,08	12,08	7,69	39,82
	3a.	6,99	12,09	12,09	8,32	39,85
Julio	1a.	6,92	12,02	12,02	8,27	39,54
	2a.	6,78	11,93	11,93	8,11	38,90
	3a.	5,57	11,78	11,78	7,48	37,61
Agosto	1a.	6,24	11,55	11,55	6,97	36,29
	2a.	5,38	11,28	11,28	6,43	34,91
	3a.	5,44	10,94	10,94	5,88	33,15
Septiembre	1a.	4,89	10,48	10,48	5,04	30,82
	2a.	4,34	10,08	10,08	4,37	28,88
	3a.	3,75	9,44	9,44	3,44	26,40
Octubre	1a.	3,16	8,83	8,83	3,15	23,97
	2a.	2,85	8,20	8,20	2,81	22,08
	3a.	2,13	7,56	7,56	2,10	19,37
Noviembre	1a.	1,67	6,87	6,87	1,59	17,08
	2a.	1,30	6,32	6,32	1,49	15,63
	3a.	1,22	5,85	5,85	1,26	14,14
Diciembre	1a.	0,92	5,51	5,51	0,92	12,86
	2a.	0,83	5,31	5,31	0,84	12,28
	3a.	0,81	5,27	5,27	0,80	12,17

TABLA 3
 PROMEDIOS RADIACION POTENCIAL
 (G_p en MJ/m^2)

MES	DECENA	Hora/TSV				T
		6-9 h.	9-12 h.	12-15 h.	15-Ocaso	
Enero	1a.	—	—	—	—	—
	2a.	—	—	—	—	—
	3a.	1,06	4,66	4,75	1,34	11,76
Febrero	1a.	—	—	—	—	—
	2a.	1,22	5,09	5,39	1,72	14,28
	3a.	1,39	5,33	6,17	2,06	15,71
Marzo	1a.	1,72	5,67	6,72	3,02	16,38
	2a.	2,02	6,09	7,14	3,49	17,81
	3a.	2,18	6,72	7,73	3,61	20,33
Abril	1a.	2,33	7,22	8,24	4,07	21,80
	2a.	2,60	7,56	8,57	4,58	23,50
	3a.	2,73	7,90	9,03	4,62	24,25
Mayo	1a.	3,36	8,19	9,42	5,25	26,29
	2a.	3,44	8,57	9,64	5,46	27,09
	3a.	3,63	8,99	9,91	5,75	27,30
Junio	1a.	3,65	9,36	10,25	6,05	27,72
	2a.	3,70	9,58	10,46	6,13	27,80
	3a.	3,70	9,66	10,50	6,13	27,85
Julio	1a.	3,36	9,53	10,29	5,88	27,51
	2a.	3,23	9,11	9,83	5,71	26,84
	3a.	2,98	8,74	9,28	5,25	29,58
Agosto	1a.	2,94	8,40	8,82	4,62	24,99
	2a.	2,81	8,15	8,40	4,16	23,52
	3a.	2,52	7,81	8,06	4,11	22,01
Septiembre	1a.	2,44	7,27	7,56	3,99	21,08
	2a.	2,39	6,89	7,09	3,32	19,32
	3a.	2,10	6,26	6,64	2,94	18,06
Octubre	1a.	1,81	5,63	6,22	2,86	16,80
	2a.	1,26	5,08	5,79	2,31	15,62
	3a.	0,92	4,91	5,46	2,19	14,91
Noviembre	1a.	0,88	4,58	5,04	1,01	14,28
	2a.	—	—	—	—	—
	3a.	0,42	4,20	4,24	0,69	11,38
Diciembre	1a.	—	—	—	—	—
	2a.	—	—	—	—	—
	3a.	—	—	—	—	—

TABLA 4

	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	Hora/TSV
ENERO								
1a.	0,18	0,15	0,20	—	—	0,14	—	6-9 h.
	2,34	1,67	2,10	—	—	3,23	2,11	9-12 h.
	1,84	2,17	3,52	—	—	2,94	2,53	12-15 h.
	0,21	0,42	0,30	—	—	0,10	0,27	15-Oc.
	4,57	5,71	6,52	—	—	7,04	4,91	T
	0,21	0,34	0,27	—	0,46	—	—	6-9 h.
	2,12	2,54	1,99	—	3,02	2,11	2,44	9-12 h.
	2,54	2,64	3,28	—	3,17	3,09	2,26	12-15 h.
	0,05	0,17	0,38	—	0,15	1,31	0,34	15-Oc.
	4,92	5,69	5,92	—	8,76	6,51	5,04	T
3a.	0,32	0,54	0,50	—	0,38	0,49	0,23	6-9 h.
	1,96	2,64	3,01	—	2,03	3,07	1,87	9-12 h.
	3,10	4,12	2,26	—	2,74	3,76	2,92	12-15 h.
	1,28	0,60	0,77	—	1,07	0,87	0,15	15-Oc.
	6,66	8,02	6,54	—	6,22	8,19	5,17	T
FEBRERO								
1a.	0,71	0,36	0,64	—	0,67	0,25	0,43	6-9 h.
	3,02	1,24	3,96	—	3,22	2,64	2,94	9-12 h.
	4,07	3,26	4,24	—	4,11	3,25	3,51	12-15 h.
	2,18	0,75	1,07	—	2,09	1,09	0,91	15-Oc.
	10,98	5,61	9,91	—	10,09	7,73	7,88	T
2a.	1,22	0,54	1,16	—	0,64	0,69	0,42	6-9 h.
	3,26	2,84	2,97	—	3,64	3,07	2,91	9-12 h.
	4,24	3,54	4,10	—	4,54	3,91	4,06	12-15 h.
	1,75	0,79	1,83	—	1,36	2,55	0,54	15-Oc.
	10,47	7,71	10,06	—	12,18	10,22	7,74	T
3a.	0,98	0,72	0,79	—	0,75	0,97	0,84	6-9 h.
	4,21	3,24	3,57	—	4,01	4,17	3,52	9-12 h.
	6,62	3,61	4,32	—	3,27	5,19	4,72	12-15 h.
	1,58	1,84	2,16	—	1,23	2,83	1,24	15-Oc.
	14,39	9,41	10,84	—	9,26	13,16	9,74	T
MARZO								
1a.	1,36	0,82	1,17	—	0,98	1,02	0,89	6-9 h.
	5,87	3,27	4,79	—	4,92	3,61	4,12	9-12 h.
	6,16	2,24	6,33	—	4,07	5,84	4,24	12-15 h.
	1,75	0,31	2,25	—	0,51	2,81	3,97	15-Oc.
	15,14	6,64	14,54	—	10,48	13,28	13,18	T
2a.	0,86	0,74	1,48	1,02	1,34	1,52	1,79	6-9 h.
	3,32	2,24	5,25	4,86	3,87	4,97	9,16	9-12 h.
	4,54	4,21	5,75	4,89	4,62	5,48	5,93	12-15 h.
	1,46	1,29	3,14	1,74	1,28	1,23	3,73	15-Oc.
	10,18	8,48	15,62	12,51	11,11	13,20	20,61	T

TABLA 4 (CONTINUACION)

	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	Hora/TSV
3a.	1,16	1,68	1,20	0,98	1,02	1,79	1,55	6-9 h.
	4,97	5,64	5,20	4,71	4,83	6,38	5,72	9-12 h.
	5,62	5,97	4,99	4,81	5,01	8,27	5,93	12-15 h.
	2,66	3,12	2,75	0,93	1,15	2,72	2,82	15-Oc.
	14,41	16,40	14,14	11,43	12,01	19,16	16,02	T
ABRIL								
1a.	0,94	1,52	2,01	1,20	2,00	1,36	1,82	6-9 h.
	4,22	5,66	8,26	4,48	6,28	5,50	6,13	9-12 h.
	5,20	6,10	6,99	5,49	6,67	5,78	6,82	12-15 h.
	1,49	3,29	2,36	3,30	4,64	2,62	3,44	15-Oc.
	11,85	16,57	19,62	14,47	19,59	15,26	18,21	T
2a.	0,72	2,10	4,31	1,91	0,62	1,72	1,92	6-9 h.
	3,54	5,96	6,62	6,10	5,81	5,54	7,73	9-12 h.
	3,62	6,61	7,02	6,24	6,41	6,36	9,58	12-15 h.
	0,46	3,91	3,14	5,86	3,79	3,29	1,59	15-Oc.
	8,34	18,58	21,09	20,11	17,63	16,91	20,82	T
3a.	1,16	1,62	2,24	1,54	1,01	4,46	1,97	6-9 h.
	4,20	5,48	6,10	5,24	5,72	10,64	6,72	9-12 h.
	4,29	5,82	6,80	5,24	5,10	13,68	7,86	12-15 h.
	1,97	4,41	6,67	3,71	1,96	2,39	3,97	15-Oc.
	11,62	17,33	21,81	14,73	13,79	31,17	20,52	T
MAYO								
1a.	1,31	2,10	1,72	1,51	2,26	2,42	3,24	6-9 h.
	5,27	6,28	6,02	5,94	6,72	7,78	7,84	9-12 h.
	6,36	7,12	6,95	6,48	7,86	8,69	7,36	12-15 h.
	2,06	4,29	3,49	2,04	2,81	3,84	5,26	15-Oc.
	15,00	19,79	18,18	15,97	19,65	22,37	23,72	T
2a.	1,63	2,34	1,97	3,00	1,82	2,87	1,91	6-9 h.
	5,89	6,83	6,29	7,56	6,92	9,21	5,89	9-12 h.
	6,09	7,42	7,12	7,98	7,31	9,30	6,99	12-15 h.
	0,51	3,26	3,04	2,83	3,17	6,13	3,24	15-Oc.
	18,83	19,82	18,42	21,37	19,22	27,51	18,03	T
3a.	1,83	2,72	2,01	2,81	1,74	2,10	2,61	6-9 h.
	6,01	8,49	6,92	7,66	7,12	7,92	7,47	9-12 h.
	6,09	9,04	7,26	8,24	7,51	8,14	8,25	12-15 h.
	0,69	3,07	1,61	6,06	2,63	5,26	1,75	15-Oc.
	14,62	23,32	17,80	24,77	19,00	23,00	20,08	T
JUNIO								
1a.	1,96	2,98	2,04	2,39	2,10	2,58	2,33	6-9 h.
	6,24	7,69	6,48	7,84	7,91	9,11	7,16	9-12 h.
	6,57	8,21	6,53	7,92	8,01	9,71	7,86	12-15 h.
	1,58	4,23	1,98	3,62	4,81	3,93	4,22	15-Oc.
	16,35	23,11	17,03	21,78	22,83	24,33	21,57	T

TABLA 4 (CONTINUACION)

	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	Hora/TSV
2a.	2,49	2,10	2,08	2,51	1,98	2,36	2,49	6-9 h.
	7,72	7,31	7,30	7,82	7,22	7,56	7,64	9-12 h.
	7,97	7,42	7,62	8,22	7,59	8,03	7,87	12-15 h.
	4,01	2,33	3,39	5,35	4,22	3,89	6,06	15-Oc.
	22,19	19,16	20,39	23,9	20,01	21,84	22,03	T
3a.	2,06	2,59	2,78	1,97	2,40	2,12	2,94	6-9 h.
	6,07	7,59	7,94	6,01	7,46	7,68	8,24	9-12 h.
	6,24	7,78	8,26	6,12	7,59	8,10	8,32	12-15 h.
	5,46	4,83	4,43	3,02	3,55	4,42	6,27	15-Oc.
	19,83	22,79	23,91	17,12	21,00	21,32	25,77	T
JULIO								
1a.	2,16	1,27	2,94	2,91	2,76	2,31	2,17	6-9 h.
	7,22	5,24	7,89	7,63	7,71	7,02	6,96	9-12 h.
	7,44	5,29	7,95	7,86	8,21	7,54	6,82	12-15 h.
	4,14	2,57	7,34	6,82	5,74	3,13	3,32	15-Oc.
	20,96	14,37	26,12	25,22	24,42	20,00	19,27	T
2a.	1,96	2,74	2,06	2,33	2,71	2,12	2,68	6-9 h.
	5,26	8,06	5,48	7,44	7,96	7,00	7,11	9-12 h.
	5,49	8,10	5,56	7,52	8,02	7,10	7,74	12-15 h.
	4,33	4,64	5,76	4,92	4,45	4,05	6,01	15-Oc.
	17,04	23,54	18,86	22,21	23,14	20,27	23,62	T
3a.	2,06	2,16	—	2,34	1,97	2,26	2,00	6-9 h.
	6,01	7,26	—	6,98	6,56	6,97	6,17	9-12 h.
	6,44	7,59	—	7,86	7,46	7,48	6,36	12-15 h.
	5,46	3,56	—	5,77	4,86	4,26	4,32	15-Oc.
	10,97	20,57	—	22,95	20,85	21,87	19,95	T
AGOSTO								
1a.	1,67	2,26	1,63	1,74	2,37	2,49	2,26	6-9 h.
	6,24	6,94	6,12	6,07	7,17	7,29	7,07	9-12 h.
	6,36	7,26	6,24	6,26	7,49	7,76	7,26	12-15 h.
	4,65	5,20	3,90	4,01	5,35	5,52	3,53	15-Oc.
	18,92	21,66	17,89	17,97	22,38	23,05	20,72	T
2a.	2,06	1,96	2,12	1,43	1,27	2,10	1,84	6-9 h.
	6,94	6,98	7,03	6,24	6,05	6,77	6,38	9-12 h.
	7,12	7,24	7,67	6,64	5,47	6,89	6,64	12-15 h.
	4,02	5,08	4,43	4,85	3,29	4,25	3,69	15-Oc.
	21,14	21,26	21,85	19,16	16,08	20,31	19,85	T
3a.	1,66	1,54	1,77	1,92	2,07	1,24	1,66	6-9 h.
	6,12	6,24	6,64	6,98	7,07	5,22	5,02	9-12 h.
	6,43	6,37	6,87	7,01	7,09	5,66	6,02	12-15 h.
	3,66	3,47	4,33	3,76	5,64	1,42	5,03	15-Oc.
	17,87	17,62	18,61	19,67	21,87	13,54	17,73	T

TABLA 4 (CONTINUACION)

	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	Hora/TSV
SEPTIEMBRE								
1a.	1,17	1,26	1,88	0,96	1,45	1,03	1,63	6-9 h.
	5,42	5,03	6,54	4,82	5,88	6,61	5,54	9-12 h.
	6,17	4,97	6,67	5,42	6,63	5,57	6,14	12-15 h.
	3,84	2,86	4,57	2,41	4,35	5,32	3,96	15-Oc.
	16,60	14,12	19,66	13,61	18,31	18,53	17,61	T
2a.	0,95	0,91	0,84	1,34	1,27	1,35	1,67	6-9 h.
	5,37	4,78	4,36	5,84	5,44	5,17	5,59	9-12 h.
	5,62	5,00	4,52	6,03	5,82	5,20	5,75	12-15 h.
	3,61	3,25	1,06	3,92	3,79	5,25	3,52	15-Oc.
	15,64	14,24	10,78	17,13	16,32	16,97	16,23	T
3a.	0,97	0,82	0,95	1,32	1,47	1,13	0,90	6-9 h.
	4,54	4,02	4,21	5,17	4,86	6,70	4,03	9-12 h.
	4,67	4,16	4,01	5,32	5,28	7,13	4,36	12-15 h.
	4,27	2,35	2,86	4,88	3,66	2,01	3,97	15-Oc.
	14,45	11,35	12,03	16,69	15,27	16,72	12,26	T
OCTUBRE								
1a.	0,77	0,91	1,12	1,16	0,66	0,72	0,65	6-9 h.
	4,02	4,16	4,73	4,65	3,97	4,50	3,52	9-12 h.
	4,47	4,59	5,17	5,29	4,33	4,46	4,00	12-15 h.
	1,08	2,70	3,20	3,64	2,78	3,88	0,86	15-Oc.
	10,08	12,36	14,22	14,74	11,74	13,56	8,63	T
2a.	0,84	0,66	0,99	0,71	0,75	1,45	0,68	6-9 h.
	3,85	3,21	4,02	3,44	3,36	4,92	3,03	9-12 h.
	4,63	3,84	4,72	3,92	3,75	4,77	3,63	12-15 h.
	1,90	1,75	3,01	2,48	3,12	3,27	2,22	15-Oc.
	11,22	9,36	12,74	10,25	10,86	13,51	9,57	T
3a.	0,54	0,82	0,80	0,77	0,76	0,89	0,52	6-9 h.
	2,68	3,24	3,48	3,07	3,73	3,27	2,51	6-9 h.
	3,27	3,79	4,17	3,99	4,99	4,12	3,63	12-15 h.
	3,26	2,42	2,91	2,16	2,24	2,15	1,46	15-Oc.
	9,75	10,27	11,36	10,05	11,86	11,43	8,22	T
NOVIEMBRE								
1a.	1,03	0,44	0,62	0,64	0,53	0,40	0,68	6-9 h.
	3,27	2,02	2,47	3,01	2,86	2,30	5,10	9-12 h.
	3,89	3,05	3,51	4,02	3,59	3,73	4,39	12-15 h.
	2,06	1,71	1,57	1,70	1,02	1,03	1,08	15-Oc.
	10,25	7,22	8,17	9,37	8,10	8,16	11,45	T
2a.	0,52	0,54	0,20	0,40	0,50	0,28	0,36	6-9 h.
	2,59	2,72	2,10	2,26	2,46	1,95	3,42	9-12 h.
	3,10	3,41	2,42	3,03	3,01	2,41	4,42	12-15 h.
	1,69	1,03	1,45	0,83	0,53	1,30	0,26	15-Oc.
	7,79	8,05	6,27	7,52	7,40	6,94	8,21	T

TABLA 4 (CONCLUSION)

	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	Hora/TSV
3a.	0,28	0,49	0,30	0,29	0,44	0,29	0,43	6-9 h.
	2,26	3,05	2,32	2,41	3,17	2,02	2,10	9-12 h.
	2,54	2,82	2,30	2,72	2,88	2,62	3,92	12-15 h.
	0,21	0,20	0,44	0,48	0,69	1,03	0,98	15-Oc.
	5,10	6,42	5,36	5,52	6,43	5,46	6,71	T
DICIEMBRE								
1a.	0,24	0,15	0,20	0,12	0,29	0,17	0,16	6-9 h.
	2,02	1,79	1,99	1,62	2,21	1,54	2,04	9-12 h.
	2,51	2,01	2,30	2,07	2,64	2,14	2,16	12-15 h.
	0,29	0,37	0,51	0,44	0,29	0,65	0,31	15-Oc.
	5,06	4,22	4,94	4,15	5,29	4,50	4,53	T
2a.	0,10	0,20	0,28	0,11	0,21	0,09	0,20	6-9 h.
	1,16	2,00	2,11	1,26	1,99	1,82	1,63	9-12 h.
	1,89	2,10	2,23	2,20	2,60	2,70	2,40	12-15 h.
	0,77	0,40	0,48	0,61	0,23	0,13	0,31	15-Oc.
	3,92	4,71	5,39	4,18	5,07	4,74	4,54	T
3a.	0,19	0,12	0,08	0,20	0,18	0,13	0,15	6-9 h.
	1,71	1,36	1,29	1,95	1,74	1,70	1,59	9-12 h.
	2,21	2,20	1,72	2,46	2,27	2,40	2,39	12-15 h.
	0,56	0,33	0,45	0,78	0,17	0,20	0,36	15-Oc.
	4,77	4,21	3,84	5,49	4,98	4,50	4,55	T

TABLA 5
RADIACION SOLAR GLOBAL (G)
(Promedio de los años estudiados; M_1/m^2)

MES	DECENA	Hora/TSV				
		6-9 h.	9-12 h.	12-15 h.	15-Ocaso	T
Enero	1a.	0,17	2,28	2,60	0,26	5,67
	2a.	0,32	2,37	2,83	0,40	6,14
	3a.	0,41	2,43	3,15	0,70	6,80
Febrero.....	1a.	0,51	2,84	3,74	1,11	8,70
	2a.	0,70	3,13	4,17	1,31	9,73
	3a.	0,86	3,86	4,66	1,71	11,30
Marzo.....	1a.	1,04	4,43	4,98	2,10	12,55
	2a.	1,25	4,81	5,06	2,50	13,62
	3a.	1,34	5,35	5,80	2,67	15,26
Abril	1a.	1,55	5,79	6,15	2,75	16,15
	2a.	1,90	5,90	6,55	2,98	17,64
	3a.	2,00	6,30	6,97	3,46	18,71
Mayo	1a.	2,08	6,55	7,26	3,49	19,24
	2a.	2,22	6,97	7,56	4,07	20,82
	3a.	2,26	7,37	7,79	4,51	21,93
Junio.....	1a.	2,32	7,49	7,83	4,70	22,34
	2a.	2,34	7,50	7,85	5,24	22,93
	3a.	2,42	7,51	7,91	5,51	23,39
Julio	1a.	2,35	7,29	7,73	5,49	22,86
	2a.	2,31	7,13	7,51	5,26	22,20
	3a.	2,18	6,92	7,30	4,61	21,03
Agosto	1a.	2,00	6,77	7,05	4,20	20,37
	2a.	1,85	6,71	6,67	4,11	19,95
	3a.	1,73	6,23	6,42	4,03	18,13
Septiembre.....	1a.	1,34	5,71	5,92	3,78	16,92
	2a.	1,19	5,25	5,42	3,57	15,33
	3a.	1,08	4,79	4,99	2,89	14,11
Octubre	1a.	0,87	4,25	4,62	2,77	12,19
	2a.	0,80	3,69	4,18	2,30	11,07
	3a.	0,70	3,14	3,88	2,00	10,42
Noviembre	1a.	0,62	2,99	3,64	1,03	8,96
	2a.	0,40	2,54	3,11	0,84	7,48
	3a.	0,36	2,49	2,99	0,57	6,47
Diciembre	1a.	0,19	1,93	2,29	0,42	4,67
	2a.	0,17	1,71	2,22	0,33	4,65
	3a.	0,15	1,62	2,18	0,25	4,62

TABLA 6
RADIACION GLOBAL TEORICA (G/G_0)
(Promedios decenales en %)

MES	DECENA	Hora/TSV				T
		6-9 h.	9-12 h.	12-15 h.	15-Ocaso	
Enero	1a.	19,7	42,1	47,9	29,7	44,9
	2a.	31,4	41,2	49,3	39,1	45,3
	3a.	33,4	39,5	50,9	45,8	47,7
Febrero	1a.	29,0	41,7	54,9	62,7	50,7
	2a.	34,9	42,2	56,2	65,5	51,6
	3a.	34,7	47,6	57,4	70,4	53,4
Marzo	1a.	32,9	51,4	57,7	66,5	51,7
	2a.	28,6	51,9	54,6	66,3	48,3
	3a.	28,2	54,2	58,7	65,7	52,8
Abril	1a.	32,5	55,4	58,8	64,8	51,8
	2a.	35,7	54,1	60,0	64,2	54,8
	3a.	34,6	54,4	56,7	64,9	54,1
Mayo	1a.	33,9	54,0	59,7	63,6	53,4
	2a.	34,3	55,0	60,1	67,0	52,0
	3a.	33,7	56,7	60,2	70,5	54,3
Junio	1a.	33,7	57,2	61,0	73,4	54,0
	2a.	33,6	57,9	60,4	72,7	53,6
	3a.	34,6	58,5	61,2	71,5	54,4
Julio	1a.	34,0	59,4	61,0	66,4	54,3
	2a.	34,2	59,7	60,9	68,9	54,6
	3a.	33,2	58,8	60,1	72,5	55,2
Agosto	1a.	32,0	58,6	59,8	66,3	57,0
	2a.	31,6	59,5	60,5	66,1	57,7
	3a.	31,8	57,3	59,9	68,6	54,7
Septiembre	1a.	30,4	57,2	60,1	65,0	55,9
	2a.	29,7	56,8	58,8	61,7	55,3
	3a.	30,7	56,7	60,4	62,7	54,5
Octubre	1a.	31,5	57,4	59,1	68,8	53,9
	2a.	30,2	50,4	57,0	62,5	52,7
	3a.	32,9	53,6	58,4	60,1	53,8
Noviembre	1a.	35,0	55,7	57,9	61,0	51,9
	2a.	30,9	50,2	56,3	67,1	50,7
	3a.	31,5	51,3	57,4	63,5	52,3
Diciembre	1a.	27,8	50,4	54,2	40,4	50,0
	2a.	27,7	50,5	53,7	37,2	47,8
	3a.	19,1	40,7	46,4	23,1	40,9

TABLA 7
RADIACION POTENCIAL: RADIACION GLOBAL TEORICA (G_p/G_0)
(Promedios decenales en %)

MES	DECENA	Hora/TSV				
		6-9 h.	9-12 h.	12-15 h.	15-Ocaso	T
Enero	1a.	—	—	—	—	—
	2a.	—	—	—	—	—
	3a.	—	—	—	—	—
Febrero	1a.	—	—	—	—	—
	2a.	60,6	68,7	69,8	83,6	77,6
	3a.	59,0	66,7	71,8	80,7	75,5
Marzo	1a.	60,2	65,7	77,7	88,4	78,4
	2a.	60,6	65,7	77,0	81,2	78,5
	3a.	58,4	61,6	80,1	84,3	76,2
Abril	1a.	58,8	69,5	78,9	80,2	74,5
	2a.	59,0	72,6	78,5	83,8	77,1
	3a.	50,4	73,4	76,3	76,4	75,9
Mayo	1a.	54,5	72,9	81,9	79,1	73,9
	2a.	55,2	72,7	80,2	76,5	77,2
	3a.	54,0	75,3	79,8	76,7	75,7
Junio	1a.	50,7	77,8	81,5	79,1	70,9
	2a.	52,9	79,2	82,1	79,8	73,5
	3a.	51,9	80,0	80,8	71,9	75,6
Julio	1a.	54,4	73,1	81,2	63,0	71,7
	2a.	50,9	75,3	77,9	68,0	73,5
	3a.	49,7	74,2	75,8	79,9	72,4
Agosto	1a.	51,3	72,9	80,6	80,2	72,7
	2a.	50,5	74,9	79,7	72,0	73,5
	3a.	48,7	71,3	79,0	77,1	74,6
Septiembre	1a.	52,3	73,5	79,4	75,0	73,7
	2a.	50,0	71,4	77,6	75,9	72,0
	3a.	53,9	72,8	74,4	78,0	74,1
Octubre	1a.	56,2	69,7	77,3	80,1	76,2
	2a.	54,7	71,2	75,0	82,3	74,3
	3a.	51,9	72,7	76,7	72,1	72,8
Noviembre	1a.	58,4	68,5	74,3	68,0	73,0
	2a.	—	—	—	—	—
	3a.	—	—	—	—	—
Diciembre	1a.	—	—	—	—	—
	2a.	—	—	—	—	—
	3a.	—	—	—	—	—

TABLA 8
RADIACION GLOBAL: RADIACION POTENCIAL (G/G_p)
(Promedios decenales en %)

MES	DECENA	Hora/TSV				T
		6-9 h.	9-12 h.	12-15 h.	15-Ocaso	
Enero	1a.	—	—	—	—	—
	2a.	—	—	—	—	—
	3a.	—	—	—	—	—
Febrero	1a.	—	—	—	—	—
	2a.	57,6	61,4	77,5	76,3	68,2
	3a.	62,1	72,4	75,5	79,7	71,9
Marzo	1a.	60,5	78,2	74,2	69,5	74,5
	2a.	84,5	79,1	71,2	71,3	75,9
	3a.	61,5	79,6	75,1	74,0	72,7
Abril	1a.	66,5	79,6	74,7	67,6	75,7
	2a.	72,8	78,2	76,5	65,2	75,1
	3a.	73,2	79,7	77,2	74,8	77,1
Mayo	1a.	62,2	80,0	77,2	66,5	73,2
	2a.	64,7	81,1	78,2	74,6	73,1
	3a.	62,5	81,4	78,6	78,4	74,6
Junio	1a.	70,0	80,0	76,4	75,7	76,7
	2a.	63,4	78,3	75,1	81,2	77,2
	3a.	66,2	77,8	75,4	83,2	76,5
Julio	1a.	70,1	76,5	75,1	80,2	78,1
	2a.	71,6	78,2	76,4	79,7	79,2
	3a.	72,0	79,3	78,7	77,6	81,7
Agosto	1a.	68,1	80,6	80,0	72,5	81,5
	2a.	66,2	82,4	79,8	84,8	69,3
	3a.	68,7	79,8	78,6	70,1	82,4
Septiembre	1a.	72,6	78,6	78,1	69,4	80,2
	2a.	50,0	76,2	76,0	70,1	79,4
	3a.	51,4	76,7	75,3	72,2	78,1
Octubre	1a.	48,2	73,6	74,3	68,2	72,5
	2a.	63,6	72,7	72,0	65,7	70,9
	3a.	75,9	74,0	71,7	70,3	70,1
Noviembre	1a.	70,0	75,2	72,2	70,8	70,2
	2a.	—	—	—	—	—
	3a.	—	—	—	—	—
Diciembre	1a.	—	—	—	—	—
	2a.	—	—	—	—	—
	3a.	—	—	—	—	—

INDICE

PRESENTACION	171
1. INTRODUCCION	173
Interés del trabajo	174
Objetivos	178
2. PARTE EXPERIMENTAL	181
1. Aparatos de medida	181
2. Obtención de datos y análisis de los instrumentos	181
3. Fundamentos	182
4. Evaluación de la energía radiativa	186
5. Fuentes de error	187
3. VARIABLES Y RELACIONES PROPUESTAS	189
1. Variables	189
2. Relaciones propuestas	193
4. ANALISIS DE RESULTADOS	199
1. Evolución de las variables G , G_0 , y G_p en el período estudiado	199
2. Evolución decenal y mensual de las relaciones propuestas	201
5. CONCLUSIONES	205
6. BIBLIOGRAFIA	207
APENDICE	209



G - 3786 STUDIOS FOR THE MEDICAL MATHEMATICS