

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS FACTORIAL AL ESTUDIO HIDROQUÍMICO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL TRAMO URBANO DEL ACUÍFERO ALUVIAL DEL RÍO ARLANZÓN (BURGOS)

Vázquez Marroquín, M., Marcos Naveira, L.A.

Departamento de Química. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Burgos. Av/ Cantabria, s/n, 09006 Burgos. Tfno. 947.258.937. E-mail: qplamn@ubu.es

ABSTRACT:

The present work applies the Factorial Analysis to the study of the chemistry of ground waters of the urban alluvial aquifer of the Arlanzón river (Burgos) in its average section. For 55 water samples, the Factorial Analysis for thirteen characteristic hydrochemical variables is made, obtaining an explanation of the 66% of the variance with three factors that are correlated with the more important processes of mineralización in waters of the zone, with the organic contamination and the contents of chloride, potassium and sodium, on the other hand, and finally with the contamination by nitrates.

KEY WORDS: hydrogeochemistry, Arlanzon aquifer, Factorial Analysis.

RESUMEN:

El presente trabajo aplica el Análisis Factorial al estudio del quimismo de las aguas subterráneas del acuífero aluvial urbano del río Arlanzón (Burgos) en su tramo medio. Para 55 muestras de agua, se realiza el Análisis Factorial para trece variables hidroquímicas características, obteniéndose una explicación del 66% de la varianza con tres factores que se correlacionan con los procesos de mineralización más importantes en las aguas de la zona, con la contaminación orgánica y los contenidos de cloruro, potasio y sodio, por otro lado, y finalmente con la contaminación por nitratos.

PALABRAS CLAVE: hidrogeoquímica, acuífero del Arlanzón, Análisis Factorial.

INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DE TRABAJO

El presente trabajo, basado en la investigación de la aportación que las técnicas geoestadísticas pueden hacer a la interpretación de la hidrogeoquímica del acuífero objeto de estudio forma parte de la una tesis de licenciatura que lleva por título "Calidad química y grado de contaminación de las aguas subterráneas del tramo urbano del acuífero aluvial del Arlanzón (Burgos). Se ha considerado que determinados focos de contaminación como actividades industriales, actividades urbanas, vertederos de residuos o explotaciones mineras a cielo abierto o incluso determinadas prácticas agrícolas, han podido modificar la composición natural de dichas aguas.

Los datos y medidas que se obtienen en los sistemas hidrogeoquímicos (parámetros hidroquímicos o hidráulicos), se caracterizan por presentar la información mediante múltiples variables. El análisis factorial es uno de los métodos estadísticos multivariantes más útiles para el tratamiento de esta información ya que permite la obtención de resultados más desarrollados, así como de interpretaciones hidroquímicas

de mayor relieve. Con la aplicación de esta herramienta estadística, a los datos hidroquímicos correspondientes a las aguas subterráneas del acuífero aluvial del Arlanzón, se pretende agrupar un cierto número de variables químicas en factores, procediendo posteriormente a interpretar cada factor, de modo que expliquen los principales fenómenos que intervienen en la mineralización de las aguas subterráneas de la zona de estudio. Se procedió a muestrear 55 puntos de agua (manantiales, fuentes y pozos) centrados en el aluvial subyacente a la ciudad de Burgos. Se analizaron en campo una serie de parámetros físico-químicos inestables, como el pH, la conductividad eléctrica, la temperatura, la alcalinidad, el oxígeno disuelto, y el dióxido de carbono. Asimismo se determinaron una serie de datos de interés hidrogeológico como la profundidad de la captación. Se tomaron muestras para el análisis en el laboratorio de aniones, cationes y de materia orgánica así como para la determinación cualitativa de algunos constituyentes orgánicos en el agua.

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La ciudad de Burgos se sitúa en la parte central de la cuenca hidrográfica del río Arlanzón (Cuenca del Duero). La Cuenca del Arlanzón presenta una superficie de 2.659 km², con una aportación media anual de 380-420 hm³, de los cuales 100 hm³ corresponden a descargas subterráneas procedentes de los acuíferos de la zona de estudio. Dentro de la Cuenca, existen diversas formaciones hidrogeológicas, localizándose la ciudad de Burgos fundamentalmente sobre terrazas del cuaternario reciente, sedimentos caracterizados por su elevada vulnerabilidad, debido a su elevada permeabilidad, a la escasa potencia de la zona no saturada (prácticamente siempre inferior a cuatro metros) y a la evidencia de que los flujos hidrogeológicos que se desarrollan en estos acuíferos, son todos de recorrido corto. En las figuras 1 y 2 se aprecia la situación del área de estudio en el marco geológico, tanto en la comunidad de Castilla y León, como en la provincia de Burgos.

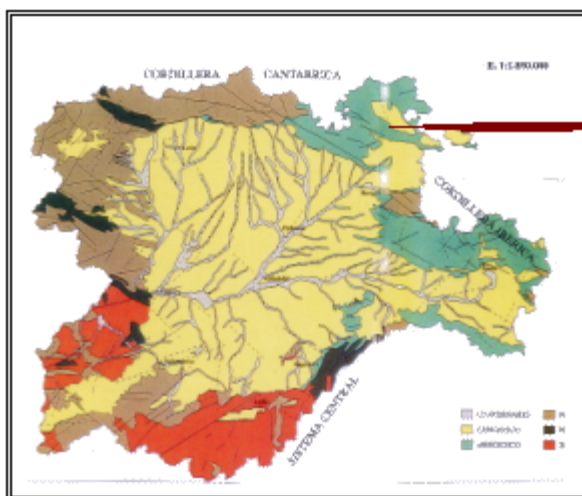


Figura 1. Localización de la zona de estudio en el marco geológico de la Comunidad de Castilla y León (ITGE, 1998)

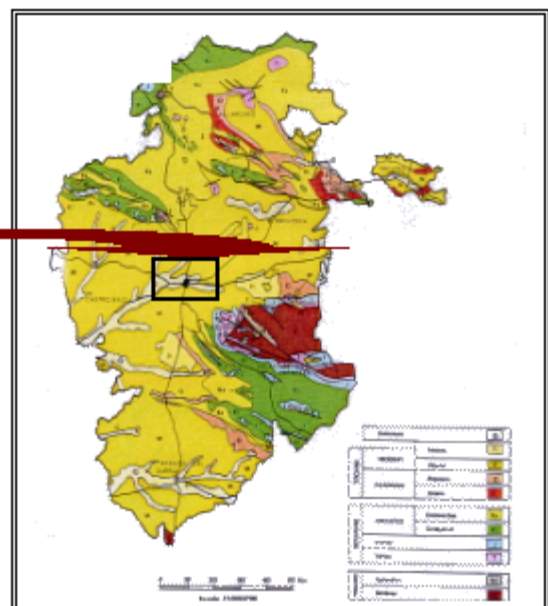


Figura 2. Localización de la zona de estudio en el marco geológico de la Provincia de Burgos (ITGE, 1998)

HIDROQUÍMICA DEL ACUÍFERO

La caracterización hidroquímica, a través de los diagramas de Stiff mostrados en la figura 3 determina la presencia de cuatro familias hidroquímicas que presentan subgrupos con contenidos superiores en sodio y cloruro. En la familia A, sulfatada cálcica de mineralización media-alta, las aguas con contenidos menores de sodio y cloruro, muestran un quimismo condicionado por la disolución de materiales yesíferos y se distribuyen en su mayoría al norte del río Arlanzón. Sin embargo, el subgrupo de aguas con valores superiores de sodio y cloruro, aunque también evidencian la influencia de los niveles yesíferos, la presencia de estos elevados contenidos muestran una importante contribución de los fenómenos antrópicos de contaminación. Estas aguas se concentran principalmente en el tramo urbano en el curso bajo al oeste del río.

La familia A1 sulfatada cálcica de gran mineralización presenta aguas cuyo quimismo viene condicionado por la disolución, hasta llegar casi a condiciones de saturación, del sulfato cálcico. Esta elevada concentración está probablemente causada por una alta presencia de yeso en los sedimentos o por un elevado tiempo de residencia del agua en contacto con estas especies minerales. La distribución en la zonas de estudio es aleatoria sin apreciarse una zona concreta en la que predominen. Esto es debido a que la influencia de los yesos del Terciario subyacente es más manifiesta porque el Cuaternario es menos potente o porque la descarga del Terciario es más potente. En lo referente a las muestras pertenecientes a esta familia con cantidades elevadas de sodio y cloro, evidencian igual que en el caso anterior alta presencia de mineral en los sedimentos o elevado tiempo de residencia del agua en contacto con él, sin embargo, las concentraciones de sodio y cloruro indican una fuerte contribución de los fenómenos antrópicos de contaminación a la mineralización del agua. Estas muestras se sitúan fundamentalmente en el curso bajo del río.

En las aguas hidrogenocarbonatadas cálcicas de baja mineralización o familia B, se observa un quimismo que se atribuye fundamentalmente a la infiltración de agua de lluvia y a su reacción con los materiales detrítico-sedimentarios del acuífero aluvial. La descarga del Terciario tiene una influencia baja sobre la hidrogeoquímica de esta agua, bien porque se trata de niveles de muy baja permeabilidad o porque carecen de depósitos yesíferos de carácter evaporítico. Se encuentran distribuidas en la zona sur del río. Respecto a las que poseen valores superiores de sodio y cloruro, se atribuye su mineralización a aguas jóvenes procedentes del agua de lluvia en el aluvial cuaternario y a la contaminación antrópica evidenciado por las elevadas concentraciones de estos iones entre otros constituyentes. El oeste del río, es la zona en la que se distribuyen estas muestras. En la familia C, hidrogenocarbonatada sulfatada cálcica de mineralización media-baja, las aguas que contienen niveles inferiores de sodio y cloruro muestran un quimismo debido a la mezcla de dos fenómenos geoquímicos, la disolución de carbonatos, característica de las aguas del aluvial, fruto de la infiltración del agua de lluvia, y la disolución de yesos, generado en los ambientes del Terciario yesífero subyacente. Respecto a su situación espacial, se observa que se sitúan tanto al norte como al sur del curso del fluvial. Sin embargo, aunque en las aguas con concentraciones superiores de sodio y cloruro la mineralización es debida a los mismos fenómenos que en las de valores más bajos, la influencia de la contaminación antrópica también se hace muy evidente. El curso bajo del río, es el área en la que principalmente se distribuyen esta aguas.

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS FACTORIAL

Se ha utilizado para ello la opción de Análisis Multivariante, contenida en el paquete estadístico STATGRAPHICS plus 4.0. El análisis factorial por componentes principales, considera que los ejes de referencia de los factores son ortogonales, y están localizados en un espacio n-dimensional. El eje del primer factor explica la máxima varianza, el eje del segundo maximiza la varianza residual, y así sucesivamente. Los resultados más importantes, se exponen en las tablas 2 a 6, así como en la figura 4. Se han incluido en este análisis estadístico, las variables: calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruro, sulfato, hidrogenocarbonato, nitrato, fluoruro, silicio, estroncio, el valor de la conductividad eléctrica y COT. Ha sido necesario transformar estas variables hidroquímicas en sus logaritmos decimales, dada la tendencia que ofrecen las mencionadas variables, a distribuirse en los medios hidrogeoquímicos de modo log-normal, más que de una manera normal. Como primer resultado, de la aplicación del análisis factorial a todos los datos hidrogeoquímicos, se ha obtenido la matriz de correlación de los logaritmos de las variables estudiadas que se muestra en la tabla 1.

El análisis factorial extrae, en principio, un número de factores igual al de las variables de partida; supone a los factores, obtenidos por combinación lineal de las variables originales, e independientes entre sí. La elección del porcentaje de varianza total explicada por los nuevos factores, es el hecho que determinará el número de factores a mantener. Se considera que el total de la varianza está definido como la suma de los elementos diagonales de la matriz de correlación; en el caso de este estudio, la varianza total a explicar por los factores es trece.

log Ca	1,00													
log Cl⁻	0,43	1,00												
log Cond	0,83	0,65	1,00											
log COT	0,05	0,30	0,21	1,00										
log Sr	0,72	0,26	0,77	0,16	1,00									
log F⁻	0,33	0,13	0,40	0,22	0,40	1,00								
log HCO₃⁻	0,38	0,37	0,50	0,15	0,45	0,24	1,00							
log Mg	0,41	0,36	0,47	0,11	0,51	0,37	0,35	1,00						
log NO₃⁻	0,39	0,42	0,37	0,14	0,06	0,17	0,34	0,12	1,00					
log K	0,47	0,40	0,61	0,30	0,47	0,24	0,17	0,21	0,19	1,00				
log Si	0,62	0,22	0,57	0,18	0,74	0,38	0,28	0,39	0,04	0,60	1,00			
log Na	0,28	0,77	0,63	0,38	0,38	0,12	0,37	0,27	0,07	0,54	0,38	1,00		
log SO₄²⁻	0,80	0,47	0,81	0,09	0,68	0,29	0,18	0,41	0,14	0,53	0,56	0,51	1,00	
	log Ca	log Cl⁻	log Cond	log COT	log Sr	log F⁻	log HCO₃⁻	log Mg	log NO₃⁻	log K	log Si	log Na	log SO₄²⁻	

Tabla 1. Correlación de los logaritmos de las variables

La tabla 2 recoge los trece factores extraídos por el análisis factorial, exponiendo además la varianza total que explican (autovalor), así como el porcentaje de la varianza total que explican. La última columna de dicha tabla, contiene además las varianzas acumuladas, de forma sucesiva, por los factores. Se han considerado representativos aquellos factores cuyo autovalor es superior a 1; por lo tanto se han seleccionado tres factores, los cuales explican el 65,79% de la varianza total. Los restantes factores despreciados no se han tenido en cuenta porque se correlacionan exclusivamente con

una única variable, porque explican un porcentaje poco significativo de la varianza total y porque su introducción genera más confusión en la explicación global del problema que su exclusión. Por otro lado, el primer factor explica por sí solo el 45,49% del total de la varianza del sistema, lo cual pone de manifiesto la existencia de un proceso geoquímico dominante, a la hora de explicar la hidrogeoquímica de la zona de estudio. Para poder realizar una mejor interpretación geoquímica de los factores obtenidos, se ha efectuado, una rotación ortogonal “varimax” de los citados factores. Este procedimiento hace que la distribución de los factores de carga y la varianza explicada por cada factor, sean más homogéneas. Los resultados se exponen en la tabla 3, que muestra los factores de carga o pesos de cada variable con los factores rotados.

Factor	Varianza Explicada o Autovalor	% Varianza Explicada	% Varianza Acumulada
1	5,913	45,487	45,487
2	1,478	11,369	56,856
3	1,161	8,935	65,791
4	0,965	7,424	73,214
5	0,906	6,969	80,183
6	0,829	6,380	86,563
7	0,617	4,749	91,312
8	0,471	3,626	94,939
9	0,231	1,776	96,715
10	0,195	1,498	98,213
11	0,132	1,019	99,232
12	0,057	0,436	99,667
13	0,043	0,333	100,000

Tabla 2. Análisis Factorial. Factores, autovalores y varianza que explican

Tabla 3. Factores de carga o pesos de cada variable con los factores rotados

Variable	Factor		
	1	2	3
Ca	0,840	0,100	0,323
Cl ⁻	0,226	0,711	0,527
Cond.	0,772	0,438	0,323
COT	-0,009	0,652	-0,001
Sr	0,894	0,177	-0,094
F ⁻	0,553	-0,018	0,102
HCO ₃ ⁻	0,599	0,202	0,195
Mg	0,602	0,079	0,151
NO ₃ ⁻	0,132	0,050	0,904
K	0,486	0,591	-0,048
Si	0,810	0,240	-0,218
Na	0,263	0,880	0,063
SO ₄ ²⁻	0,742	0,330	0,088

También, una vez aplicada la rotación “Varimax”, el programa STATGRAPHICS recalcula los valores de las comunalidades de cada variable; se obtienen así las comunalidades estimadas que se exponen en la tabla 4.

Tabla 4. Comunalidades de la variables con los factores rotados

Variable	Comunalidad
Ca	0,819
Cl⁻	0,834
Cond.	0,893
COT	0,425
Sr	0,840
F⁻	0,317
HCO₃⁻	0,438
Mg	0,391
NO₃⁻	0,837
K	0,587
Si	0,761
Na	0,847
SO₄²⁻	0,668

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los factores obtenidos mediante la aplicación del análisis factorial a los datos hidroquímicos del acuífero, (véase tabla 3 y figura 4) resumen la información hidrogeoquímica de las muestras estudiadas. Además de la tabla 3, que expone los factores de carga -o pesos-, de las trece variables estudiadas para los tres factores rotados, estos resultados se han representado en diagramas bidimensionales, mediante ejes cartesianos ortogonales en la figura 4; en esta figura se representan las “coordenadas” de cada variable para cada pareja de factores.

▪ PRIMER FACTOR

Este factor representa el 45,49 % de la variabilidad total del sistema. Está relacionado, sobre todo, con los contenidos en calcio, conductividad, estroncio, silicio así como con los valores de sulfato. También los contenidos en magnesio, fluoruro e hidrogenocarbonato influyen en cierta manera en el primer factor. Puede asociarse con los fenómenos de mineralización más importantes en las aguas subterráneas de la zona de estudio. Además de la disolución de materiales yesíferos debido a la descarga de aguas del Terciario infrayacente, este factor parece incluir otro dos fenómenos geoquímicos de menor importancia cuantitativa como la hidrólisis de silicatos que son responsables de los contenidos de sílice y de parte del potasio en el agua y la disolución de carbonatos. Este primer factor, condiciona la mineralización de la mayor parte de las muestras y refleja además, que la disolución de sulfatos, la hidrólisis de silicatos y las disolución de carbonatos son procesos geoquímicos asociados a la incorporación a las aguas subterráneas de sus contenidos en fluoruro, estroncio y magnesio, especies químicas asociadas al calcio en los depósitos de carbonatos y sulfatos.

▪ SEGUNDO FACTOR

Este segundo factor supone el 11,37 % de la variabilidad total en el quimismo de las aguas de la zona de estudio. Este factor viene explicado por procesos geoquímicos antrópicos no naturales que generan la introducción en el medio hidrogeológico de sales solubles como cloruro, potasio y sodio y de contaminación orgánica reflejada por los valores del COT. El aporte de potasio al agua subterránea de la zona, es por tanto, fruto de una doble contribución, debido por un lado a procesos de contaminación antrópica y por otro lado atribuida a procesos geoquímicos naturales (como ya revelaba el primer factor). Los procesos contaminantes que incorporan al agua cloruro, sodio y materia orgánica están vinculados entre si.

▪ TERCER FACTOR

Este factor explica el 8,93 % de la varianza total del sistema. Evidencia la presencia de nitratos y cloruros en el agua debido a contaminación ya sea por excedentes de fertilización nitrogenada o por pérdidas de los colectores de aguas residuales. La incorporación de cloruro a las aguas subterráneas de la zona se debe por tanto a procesos de contaminación antrópica que no son uniformes, por un lado asociados a la contaminación por nitratos (como refleja el factor 3) y por otro lado asociada a la contaminación por sodio y materia orgánica (como muestra el factor 2).

BIBLIOGRAFÍA

- Helsel, D.R. y R. M. Hirsch. 1992. *Statistical Methods in Water Resources. Studies in Environmental Science 49*. Ed. Elsevier.
- Instituto Tecnológico Geominero de España. *Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000. 1997. Burgos.*
- Instituto Tecnológico Geominero de España. *Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000. 1997. Villagonzalo Pedernales.*
- Marcos Naveira, L. A. 1997. Tesis Doctoral. *Procesos geoquímicas en las aguas subterráneas de los acuíferos Terciarios y Cuaternarios de la Cuenca del río Arlanzón (Burgos)*. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Burgos.
- Molina Pérez, M.A. 1989. *Procesos Geoquímicos de interacción roca-agua relacionados con el flujo subterráneo en las arcosas del acuífero de Madrid*. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid
- Subbarao, C.; N.V.Subbarao y S.N. Chandu.1996. *Characterization of groundwater using factor análisis. Environmental Geology*. Vol. 28 (4).
- Vázquez Marroquín, M 2005. Tesis de Licenciatura. *Calidad química y grado de contaminación de las aguas subterráneas del tramo urbano del acuífero aluvial del río Arlanzón (Burgos)*. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Burgos.

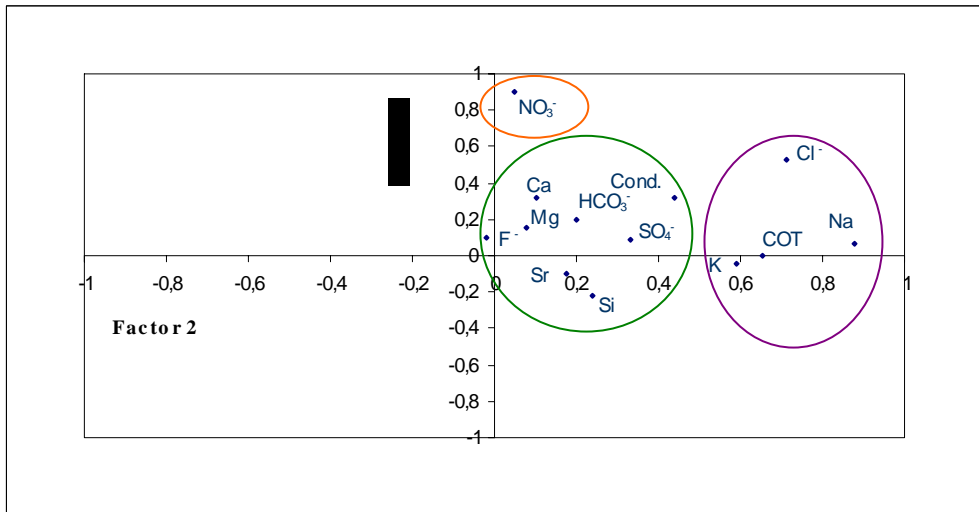
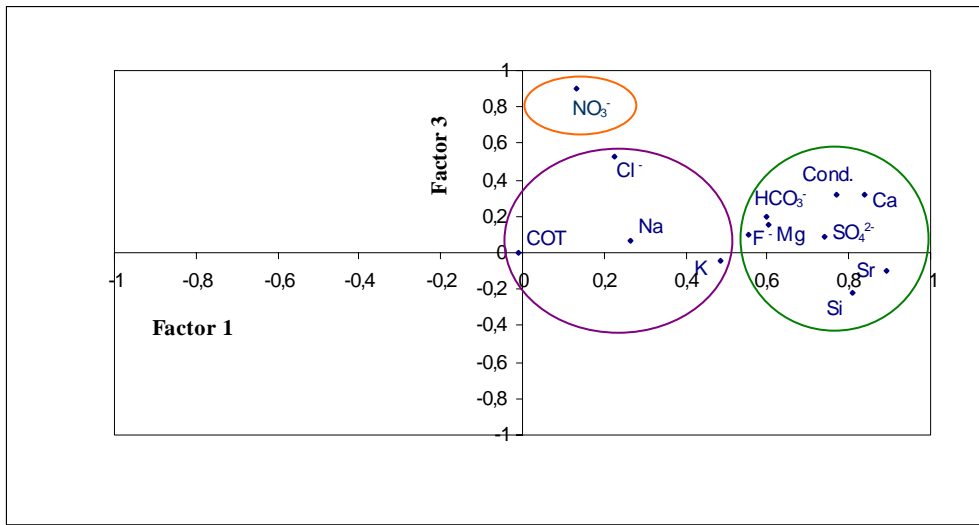
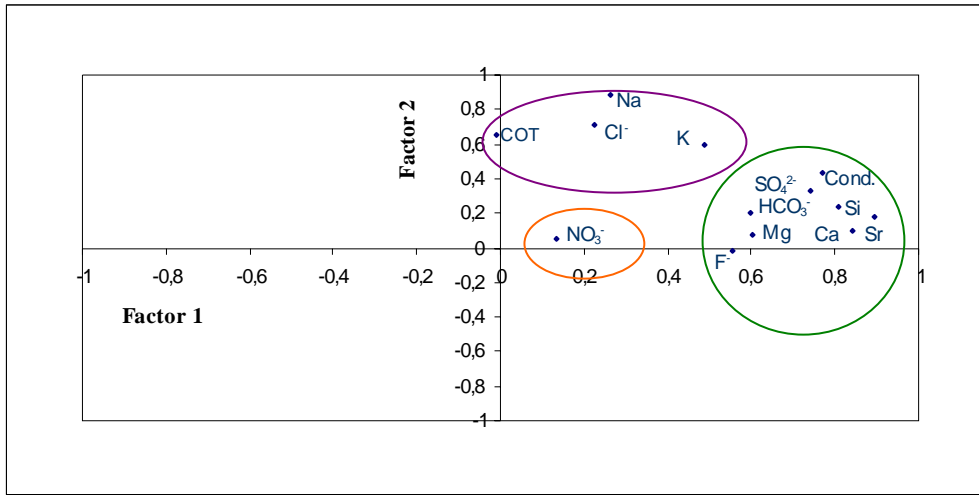


Figura 4. Representación de los factores de carga rotados de las variables

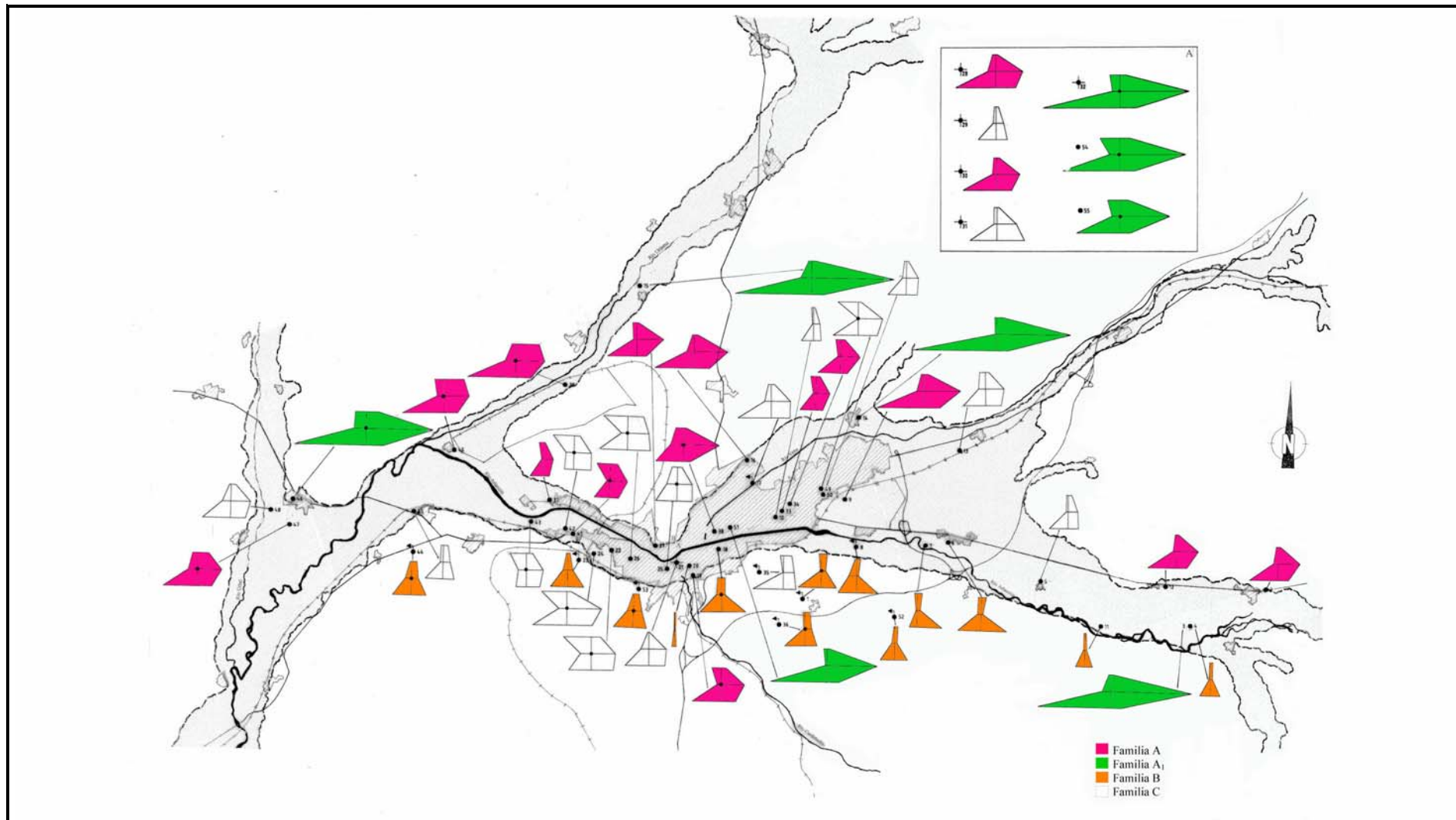


Figura 3. Diagramas de Stiff y situación de los puntos de agua en la zona de estudio