

# Indicadores geoquímicos de cambios ambientales en secuencias aluviales holocenas de Bardenas Reales

*Geochemical proxies of environmental changes in Holocene alluvial sequences from Bardenas Reales*

M<sup>a</sup> Cinta Osácar, Arsenio Muñoz y Carlos Sancho

Dpto. Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza. cinta@unizar.es, armunoz@unizar.es, csancho@unizar.es

## ABSTRACT

*Geochemical features and Chemical Index of Alteration (CIA), corrected for Ca from calcite, were studied in Holocene alluvial sequences from Bardenas Reales of Navarra. The five sequences, distinguished by using morphochronostratigraphic evidences, show a different geochemical pattern controlled by granulometric characteristics, bedrock weathering and soil processes. Geochemical proxies (CIA) indicate an increase in moisture during some phases of Early and Middle Holocene.*

**Key words:** Alluvial sequences, Chemical Index of Alteration, Holocene, Bardenas Reales.

*Geogaceta*, 47 (2009), 105-108  
ISSN: 0213683X

## Introducción

La depresión erosiva de la Bardena Blanca constituye el sector central del Parque Natural de las Bardenas Reales de Navarra (Cuenca del Ebro) (Fig. 1). El fondo de la depresión, localizado a unos 300 m de altitud, está enmarcado por relieves estructurales tabulares, al sur, y por niveles aluviales cuaternarios culminantes, al norte. El sustrato geológico (Fig. 2) está constituido básicamente por lutitas con niveles de yesos y capas de areniscas y calizas, pertenecientes a las formaciones miocenas de Ujué y Tudela (Faci *et al.*, 1997). Esta depresión se encuentra tapizada por una completa secuencia de unidades morfopedosedimentarias holocenas, de naturaleza arenosa y lutítica, que se estructuran en niveles aterrazados encajados y superpuestos (Sancho *et al.*, 2008). En la actualidad, bajo condiciones climáticas semiáridas, está drenada por los barrancos Grande, Andarraguía y Limas, afluentes del Ebro.

El control cronológico y el análisis sedimentológico del registro aluvial holoceno ha permitido avanzar en la reconstrucción de las condiciones paleoambientales y paleoclimáticas imperantes durante el Holoceno en el sector central de la Cuenca del Ebro (Muñoz *et al.*, 2006; Sancho *et al.*, 2007; 2008). En este sentido, el análisis de diferentes indicadores del registro aluvial puede contribuir a validar y mejorar las

reconstrucciones paleoambientales establecidas.

En esta línea de trabajo, el objetivo planteado consiste en la utilización de indicadores geoquímicos incluidos en los registros aluviales holocenos arenosos y lutíticos de Bardenas Reales. Aunque apenas existen referencias de la utilización de estos indicadores en secuencias aluviales recientes, Kirkwood y Nesbitt (1991) y Burke *et al.* (2009) han obtenido resultados in-

teresantes en registros recientes de laderas y suelos.

## Materiales y metodología

En el entorno de la confluencia del Barranco del Vedado con el Barranco Grande (sector septentrional de la Bardena Blanca) se reconocen cinco unidades morfosedimentarias que registran el final del Pleistoceno y el Holoceno casi completo (Figs. 3 y 4). Se han selecciona-

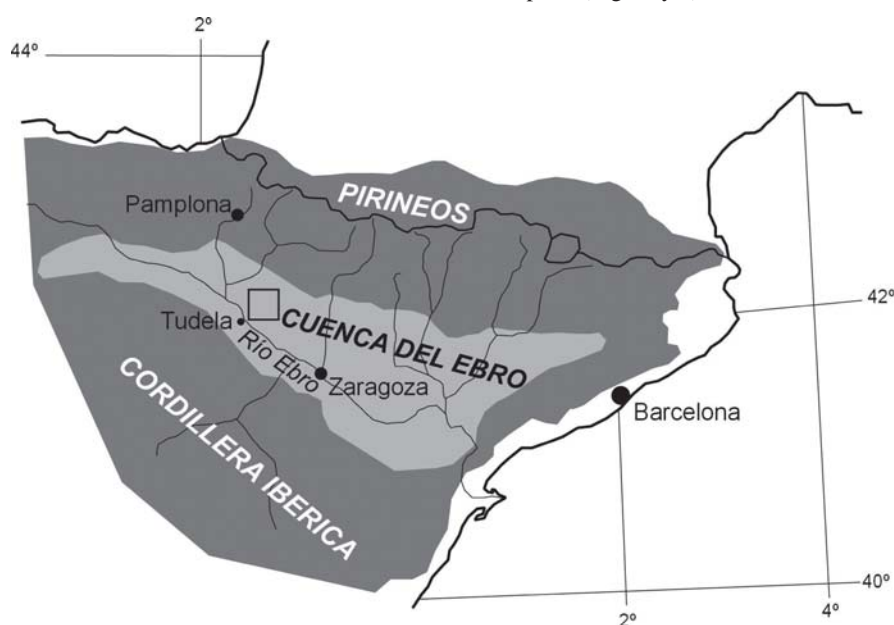
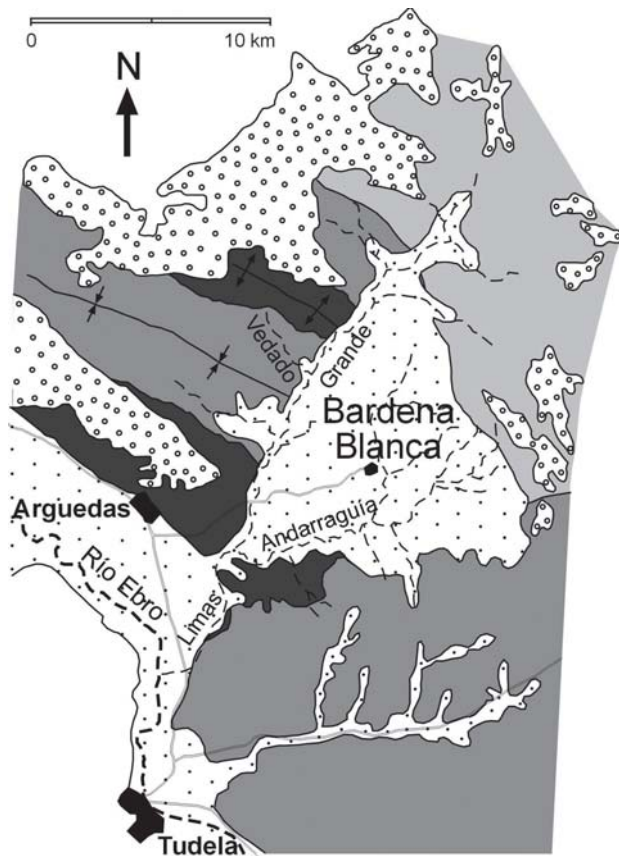


Fig. 1.- Situación de Bardenas Reales de Navarra.

*Fig. 1.- Location of Bardenas Reales of Navarra.*



- Holoceno (Llanura de inundación y niveles aluviales)
- Pleistoceno (Terrazas y glacia)
- Mioceno medio y superior (Arcillas y areniscas de Ujué)
- Mioceno medio y superior (Arcillas de Tudela)
- Mioceno inferior (Yesos de Lerin)

Fig. 2.- Marco geológico de Bardenas Reales.

Fig. 2.- Geological setting of Bardenas Reales.

1991). La presencia de grandes cantidades de calcita en los materiales analizados impide aplicar el índice directamente. Por ello, se ha introducido una corrección consistente en recalcular los análisis de los elementos mayores considerando un contenido de CaO constante de 5,5%, que es el promedio calculado por Wedepohl (1995) para la corteza continental. En estas condiciones, el índice no permite una comparación con valores CIA de otros materiales, pero sí entre los sedimentos holocenos de Bardenas.

**Resultados**

El índice CIA corregido presenta valores muy bajos, inferiores a 60 en todos los casos, lo que se debe a la corrección utilizada. No puede interpretarse directamente como un indicador de baja alteración, pero sí permite una comparación entre los índices calculados de esta manera. Así, se observa que estos valores presentan una pauta claramente diferencial en función de la unidad morfosedimentaria considerada (Figs. 5 y 6).

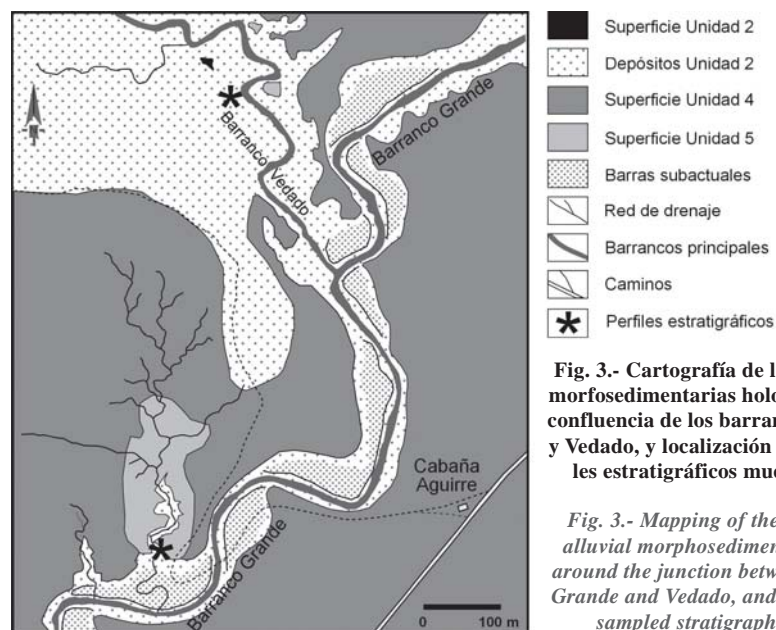
La Unidad 1 tiene una potencia que supera los 2 m y está constituida por secuencias fluviales asociadas con sistemas braided. Mientras que las arenas de la base han proporcionado una edad de 20±1 ka basada en la luminiscencia, el paleosuelo superior presenta una edad de radiocarbono de 8155±70 BP. Las muestras analizadas corresponden a material arenoso. El índice CIA corregido indica valores bajos (40-45) debido, posiblemente, a la procedencia de areniscas del sustrato e incluso otras unidades pleistocenas. Además, los valores mayores registrados en el paleosuelo pueden corresponder a un incremento de la meteorización en condiciones edáficas.

do dos afloramientos para levantar sendos perfiles estratigráficos. El control cronológico se ha establecido mediante radiocarbono y lumiscencia (OSL) (Fig. 5). Paralelamente, los perfiles fueron muestreados para realizar análisis geoquímicos elementales. Para este estudio preliminar, del total de muestras extraídas, se realizó una selección basada en las características estratigráficas de las mismas. Se han analizado 25 muestras pleistoceno-holocenas y otras 7 correspondientes al sustrato mioceno. Las determinaciones se han llevado a cabo en el Servicio General de Geocronología y Geoquímica Isotópica, de la Universidad del País Vasco, mediante un espectrómetro de masas con fuente de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Como un primer paso, se ha calculado el índice CIA (*Chemical Index of Alteration*):

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O}$$

(CaO\* es el CaO ligado a silicatos)

que indica el grado de alteración de los feldespatos a arcillas durante la meteorización por extracción diferencial de Na, K y Ca respecto al Al, que se comporta como inmóvil (Kirkwood y Nesbitt,



- Superficie Unidad 2
- Depósitos Unidad 2
- Superficie Unidad 4
- Superficie Unidad 5
- Barras subacuáticas
- Red de drenaje
- Barrancos principales
- Caminos
- Perfiles estratigráficos

Fig. 3.- Cartografía de las unidades morfosedimentarias holocenas, en la confluencia de los barrancos Grande y Vedado, y localización de los perfiles estratigráficos muestreados.

Fig. 3.- Mapping of the Holocene alluvial morphosedimentary units, around the junction between arroyos Grande and Vedado, and situation of sampled stratigraphic logs.



Fig. 4.- Unidades morfosedimentarias holocenas en el Barranco del Vedado.

Fig. 4.- Holocene morphopedosedimentary units in the Arroyo Vedado.

La Unidad 2 tiene un espesor aproximado de 18 m y está formada por sedimentos de llanura de arena, en la base, y limos y arcillas laminadas, a veces bioturbadas, de sistemas de llanura de barro y playalake. La edad de radiocarbono del tramo medio del perfil es  $7780 \pm 75$  BP y hacia techo es  $6600 \pm 65$  BP. Los valores del índice CIA corregido de los sedimentos de esta unidad (50-60) están por encima de los correspondientes al sustrato lutítico que constituye su fuente más probable. El tramo inferior arenoso presenta valores inferiores al limoarcilloso y se observa un incremento del valor del índice hacia techo. No aparecen diferencias entre los valores de las facies laminadas y las bioturbadas, de manera que la alteración observada debe de corresponder a procesos de meteorización en el área fuente, sin contribución significativa de procesos postsedimentarios.

La Unidad 3 alcanza casi los 4 m de potencia y está constituida por un conjunto de secuencias fluviales en las que destaca un término inferior con arenas de canal y otro superior con lutitas de inundación muy bioturbadas. La base tiene una edad de radiocarbono de  $4245 \pm 55$  BP y el techo de  $3005 \pm 55$  BP. Respecto al índice CIA corregido se observa una clara separación entre el valor correspondiente a las facies arenosas (45) y el de las lutitas bioturbadas (56). La diferencia de material original puede explicar este comportamiento: mientras que las primeras proceden de los niveles de areniscas del sustrato geológico y/o de unidades anteriores, las segundas presentan valores superiores a la lutita inalterada del sustrato, que adquieren por alteración en el área fuente y/o por edafización in situ.

La Unidad 4 tiene 3 m de espesor y una edad de  $925 \pm 65$  BP. Esta formada por

secuencias aluviales arenosas con altas tasas de sedimentación, geometrías canaliformes y elementos de unidades anteriores. Tan solo se dispone de datos de dos muestras pero tienen un comportamiento similar a las correspondientes de la unidad anterior, si bien los rasgos edáficos no son tan marcados.

Por último, la Unidad 5 tiene una edad de  $210 \pm 45$  BP en la base y  $85 \pm 45$  en el techo y está constituida por 5 m de arenas con características fluviales. El índice CIA corregido de las muestras analizadas presenta valores (40-45) superiores al valor del índice obtenido para areniscas miocenas. El origen de los sedimentos de esta unidad puede estar en la alteración de areniscas del sustrato pero también en tramos arenosos de unidades anteriores.

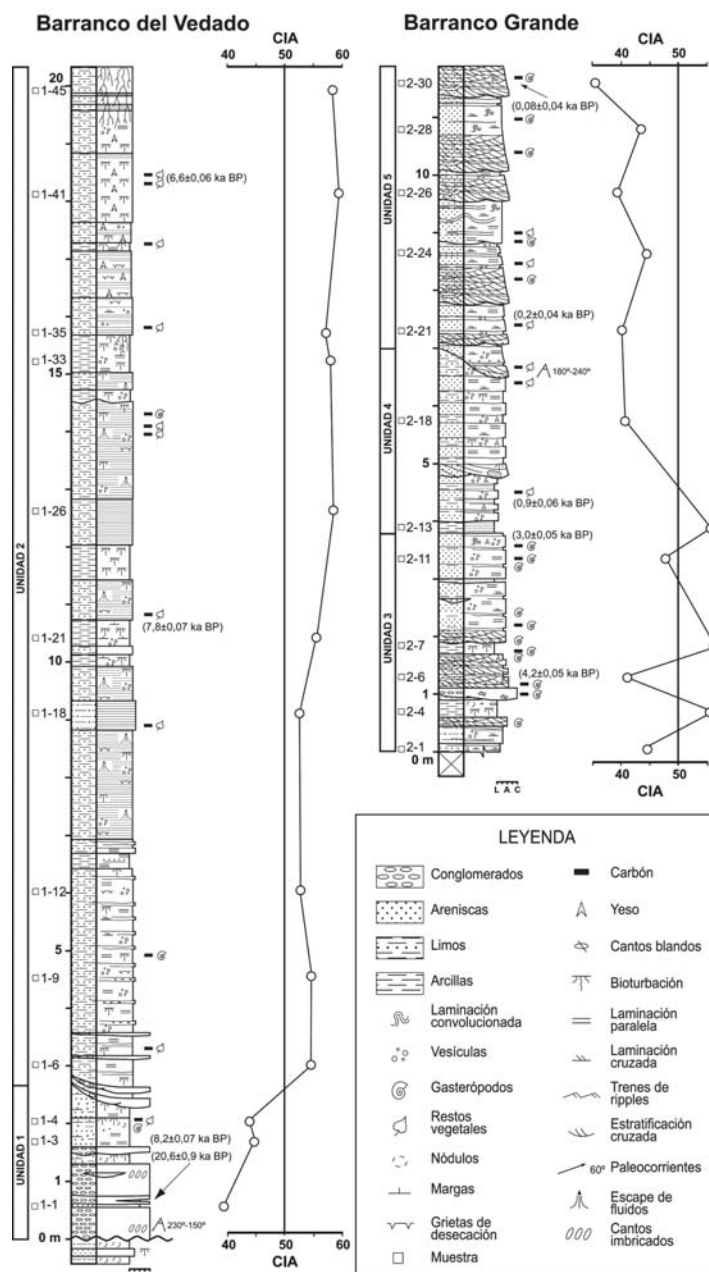
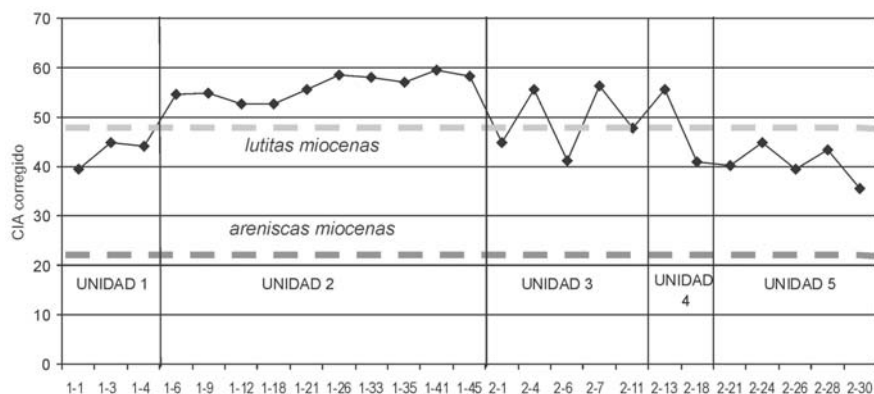


Fig. 5.- Evolución del índice de meteorización (CIA corregido) en los perfiles estratigráficos.

Fig. 5.- Evolution of the chemical index of alteration (corrected CIA) along the stratigraphic logs.





**Fig. 6.- Comparación del índice de meteorización en las unidades morfosedimentarias aluviales holocenas.**

*Fig. 6.- Comparison of the chemical index of alteration (corrected CIA) values among the Holocene morphosedimentary alluvial units.*

## Discusión

El índice de meteorización CIA corregido para el Ca muestra un comportamiento diferencial que coincide con la caracterización morfoestratigráfica holocena establecida en la depresión de la Bardena Blanca. En una valoración preliminar, este índice se presenta como una herramienta útil para complementar la información paleoambiental deducida del análisis morfoestratigráfico de estos registros aluviales holocenos (Sancho *et al.*, 2007; 2008).

A pesar del escaso periodo de tiempo transcurrido, la variabilidad climática holocena en la Depresión del Ebro (González-Sampérez *et al.*, 2009) parece haber quedado registrada en las secuencias aluviales a partir del índice de alteración química (CIA).

En general, la actividad aluvial en Bardenas Reales durante el Holoceno se interpreta en términos de la relación entre la descarga de agua y la disponibilidad de sedimentos en el área fuente (Sancho *et al.*, 2008). Así, mientras que las etapas de aluvionamiento se asocian con etapas de incremento de aridez y/o aumento de la frecuencia de eventos extremos, los periodos de encajamiento coinciden con fases de mayor humedad y desarrollo de una cobertera vegetal que limita la disponibilidad de sedimentos y favorece el desarrollo de suelos, activando los procesos de meteorización sobre laderas y superficies morfogénicas estables.

La tendencia hacia condiciones de mayor temperatura y humedad se detecta a techo de la Unidad 1, donde los procesos relacionados con paleosuelos del inicio del Holoceno parecen ejercer un papel importante en el incremento del índice CIA corregido. Los mayores valores de

este índice se observan en la Unidad 2. Quedan por encima del valor correspondiente al sustrato lutítico inalterado y se incrementan hacia techo de la unidad. Este hecho, junto con la falta de diferenciación alterológica entre facies laminadas y bioturbadas, abogaría por una meteorización del sustrato mioceno lutítico de las formaciones Ujué y Tudela. Este incremento en la meteorización coincide con una tendencia hacia condiciones más húmedas y cálidas durante el Holoceno temprano (González-Sampérez *et al.*, 2009). Las unidades 3 y 4 presentan un comportamiento similar con incremento de los valores del índice CIA corregido coincidiendo con el desarrollo de suelos sobre facies lutíticas de llanura de inundación. Esta circunstancia indicaría también condiciones de mayor disponibilidad hídrica durante el Holoceno medio, si bien a escala regional existe una tendencia hacia la aridificación (González-Sampérez *et al.*, 2009). Las arenas de la Unidad 5, con valores del índice CIA corregido inferiores, tendrían su origen, básicamente, en el retrabajamiento de unidades anteriores, durante la Pequeña Edad del Hielo, en un contexto de alta variabilidad climática (Saz, 2003).

## Conclusiones

El cálculo del Índice de Alteración Química corregido para el Ca (CIA corregido), a partir de la caracterización geoquímica de las secuencias aluviales holocenas de naturaleza arenosa y lutítica registradas en Bardenas Reales, ha permitido observar un comportamiento diferencial de las unidades basado en: 1) la naturaleza granulométrica de las unidades, dependiente del medio sedimentario y del origen del material acumulado, 2) la alte-

ración *in situ* asociada con el desarrollo de suelos en el tránsito Pleistoceno-Holoceno y en el Holoceno y medio 3) los procesos de meteorización del sustrato geológico, controlados por las condiciones paleoambientales de mayor disponibilidad hídrica durante el Holoceno temprano y medio. Son necesarios estudios adicionales para validar la utilidad paleoambiental de los indicadores geoquímicos contenidos en las secuencias aluviales holocenas.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos CGL2006-08973/BTE y CGL2009-10455/BTE. Constituye una aportación de los grupos Geotransfer, Cuencas Sedimentarias Continentales y PaleoQ del Gobierno de Aragón. Agradecemos la colaboración del Servicio General de Geocronología y Geoquímica Isotópica de la Universidad del País Vasco.

## Referencias

- Burke, B., Heimsath, A.M., Dixon, J.L., Chappell, J. y Yoo, K. (2009). *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 768-785.
- Faci, E., Castiella, J., del Valle, J., García, A., Días, A., Salvany, J.M., Cabra, P., Ramírez del Pozo, J. y Meléndez, A. (1997). *Mapa Geológico de Navarra 1:200.000*. Gobierno de Navarra.
- González-Sampérez, P., Valero-Garcés, B., Moreno, A., Morellón, M., Navas, A., Machín, J. y Delgado-Huertas, A. (2009). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 259, 157-181.
- Kirkwood, D.H. y Nesbitt, H.W. (1991). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 1295-1308.
- Muñoz, A., Sancho, C., Peña, J.L., Benito, G., Rhodes, E., McDonald, E. y Longares, L.A. (2006). *Geogaceta*, 40, 263-266.
- Sancho, C., Benito, G., Muñoz, A., Peña, J.L., Longares, L.A., McDonald, E., Rhodes, E., y Saz, M.A. (2007). *Geogaceta*, 42, 111-114.
- Sancho, C., Peña, J.L., Muñoz, A., McDonald, E., Rhodes, E.J. y Longares, L.A. (2008). *Catena*, 73, 225-238.
- Saz, M.A. (2003). *Temperaturas y precipitaciones en la mitad norte de España desde el siglo XV: Estudio dendroclimático*. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, 44, 293 p.
- Wedepohl, K.H. (1995). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 1217-123.