

Comportamiento hidráulico a largo plazo de los geocompuestos de bentonita dentro de una secuencia de sellado de un vertedero mediante una impermeabilización simple

Carlos Luengo

(Viceconsejería de Medio Ambiente, Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca, Gobierno vasco)

GEOCOMPUESTOS DE BENTONITA

Un geocompuesto de bentonita es un producto formado por una capa de arcilla (con un alto contenido en montmorillonita y que reciben el nombre comercial de bentonita) unida a una capa o capas de geosintéticos (geotextiles o geomembranas), con el fin de actuar como una barrera hidráulica artificial. Se utilizan tanto en la impermeabilización de la base de vertederos y balsas, como en sellados finales de vertederos y recuperación de suelos contaminados, así como en barreras secundarias alrededor de tanques de almacenamiento de líquidos.

Este producto parece a mediados de la década de 1980 en Norteamérica y la década siguiente en Europa.

En la literatura técnica se puede encontrar bajo los siguientes acrónimos:

- GCL = Geosynthetic Clay Liner, de amplio uso en Norteamérica.
- GBR-C = Barrera geosintética arcillosa (bentonítica), denominación utilizada por la *norma UNE EN-ISO 10318:2006*. "Geosintéticos. Términos y Definiciones".

EQUIVALENCIA ENTRE LOS GEOCOMPUESTOS DE BENTONITA Y LAS BARRERAS GEOLÓGICAS

De conformidad con el *Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*, se considera que hay barrera geológica en el vaso de un vertedero cuando haya una capa que cumpla los siguientes requisitos o protección equivalente:

- En vertederos para residuos peligrosos: $k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s y un espesor ≥ 5 m.
- En vertederos para residuos no peligrosos: $k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s y un espesor ≥ 1 m.
- En vertederos para residuos inertes: $k \leq 1,0 \times 10^{-7}$ m/s y un espesor ≥ 1 m.

En caso de que se proponga una protección equivalente y ésta esté formada por una capa de suelo compactada, su espesor mínimo ha de ser $\geq 0,5$ m. La norma no fija condiciones para otro tipo de protecciones alternativas. En cualquier caso, éstas deberán demostrar su equivalencia en términos de flujo de agua y de flujo de masa de contaminantes. En el caso de los medios de baja permeabilidad, el transporte de masa de contaminantes se produce principalmente por difusión, y en menor medida por advección.

El sellado de un vertedero tiene como función principal reducir la entrada de agua al vertedero, por lo que solo es necesario demostrar la equivalencia en términos de flujo de agua, ya que la concentración de contaminantes en el suelo de cobertura sobre la impermeabilización del sellado se supone nula. La ecuación que se presenta en el siguiente apartado, aunque diseñada para calcular la equivalencia en términos de flujo de masa por advección, permite también calcular la equivalencia en términos de flujo de agua a través de medios porosos.

Demostración de la protección equivalente al flujo de masa por advección

La protección equivalente se demuestra si el flujo de masa por advección a través de la protección alternativa propuesta es menor o igual que el flujo de masa por advección a través de la barrera geológica natural. Puede utilizarse para ello la relación entre ambos flujos en estado estacionario (USEPA, 1993):

$$R_{FS} = \frac{K_{PA} h_{BGN} (H_{PA} + h_{PA})}{K_{BGN} h_{PA} (H_{BGN} + h_{BGN})}$$

donde:

k_{BGN} = conductividad hidráulica saturada (en m/s) requerida a la barrera geológica natural.

k_{PA} = conductividad hidráulica saturada (en m/s) de la protección alternativa propuesta.

h_{BGN} = espesor (en m) requerida a la barrera geológica natural.

h_{PA} = espesor (en m) de la protección alternativa propuesta.

H_{BGN} = espesor saturado (en m) sobre la barrera geológica natural.

H_{PA} = espesor saturado (en m) sobre la protección alternativa propuesta.

Así, si $R_{FA} \leq 1$ la alternativa propuesta presenta una protección mayor que la barrera geológica natural respecto al flujo de masa por advección o al flujo de agua. Si $R_{FA} < 1$, la alternativa propuesta presenta una protección menor que la barrera geológica natural respecto al flujo de masa por advección o al flujo de agua y no puede ser aceptada.

Si la protección alternativa es un GCL, el espesor de la protección alternativa que debe considerarse en la ecuación anterior es el espesor de la capa de bentonita hidratada, no el espesor del GCL.

Si el GCL contiene una geomembrana, el flujo estará controlado por la difusión de vapor de agua a través de la geomembrana y por los defectos que tenga ésta. Y la ecuación anterior no es de aplicación.

Ejemplo: Se desea evaluar si un GCL completamente hidratado con una conductividad hidráulica $k_{PA} \leq 5 \times 10^{-11}$ m/s y un espesor de bentonita $h_{PA} = 7$ mm presenta una protección equivalente a la barrera geológica natural de la base de un vertedero para residuos no peligrosos ($k_{BGN} \geq 1 \times 10^{-9}$ m/s y $h_{BGN} = 1$ m) respecto al flujo de masa por advección. Para hacer el cálculo se supondrá que la carga hidráulica sobre ambas capas es de 0,30 m ($H_{BGN} = 0,3$ m y $H_{PA} = 0,30$ m).

Operando se obtiene: $R_{FA} = 1,69$.

Como $R_{FA} > 1$, el GCL no presenta una protección equivalente frente al flujo de masa por advección respecto a la ofrecida por la citada barrera geológica natural.

Sin embargo, si sobre el GCL se instala un geocompuesto drenante con una transmisividad tal que la carga hidráulica sobre el GCL no supere el espesor de dicho geocompuesto drenante, con lo que $H_{GCL} = 0,01$ m, se obtiene que $R_{FA} = 0,09$, con lo que el GCL junto con el citado geocompuesto drenante constituyen una protección equivalente al flujo de masa por advección.

El siguiente paso sería demostrar si, además, constituyen una protección equivalente al flujo de masa por difusión.

Si dichos geosintéticos se van instalar en el sellado de un vertedero no tiene sentido evaluar su protección al flujo de masa por difusión, porque el agua que se infiltra en la capa de suelo de cobertura del sellado, en principio, se considera que tiene una concentración nula de contaminantes.

CONDICIONES QUE HA DE CUMPLIR A LARGO PLAZO UN GEOCOMPUESTO DE BENTONITA

Rowe (2005) concluye que la vida de servicio de un geocompuesto de bentonita en una impermeabilización compuesta debe ser del orden de cientos de años, siempre que:

- 1) no haya una pérdida o un movimiento (adelgazamiento) significativo de bentonita durante su instalación o durante la explotación del vertedero,
- 2) el geocompuesto de bentonita no se deseque,
- 3) los paneles de geocompuesto de bentonita no se separen,
- 4) como haya una compatibilidad química de la bentonita con la composición de los líquidos con los que va estar en contacto -sean los lixiviados de ese vertedero, las aguas subterráneas o las aguas intersticiales del terreno sobre los que se apoya o de los suelos que tenga encima-, o el diseño haya tenido en cuenta sus efectos sobre la conductividad hidráulica,
- 5) el comportamiento del geosintético presente en el geocompuesto de bentonita no afecte al comportamiento de la bentonita (en caso contrario el geosintético controlaría la vida de servicio del geocompuesto de bentonita). Las predicciones sobre el comportamiento del geocompuesto de

bentonita deben considerar la estabilidad global y local de los taludes, la degradación de la resistencia y el transporte de compuestos químicos.

PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN SU CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Se han realizado numerosos ensayos para determinar los efectos de la prehidratación, la presión confinante, el intercambio catiónico y otros factores sobre la compatibilidad química. Según Kolstad et al. (2004) un GCL prehidratado hasta alcanzar un espesor y una relación de vacíos uniforme parece mantener su conductividad hidráulica al ser permeado con una solución de CaCl_2 . El efecto de la prehidratación también depende de la carga hidráulica aplicada para introducir el agua en el GCL. Sin embargo, la prehidratación debida sólo a la capilaridad es un proceso poco efectivo para mejorar la compatibilidad química del GCL en presencia de sales (Vasko et al., 2001). Thiel & Criley (2003) muestran que bajo una alta presión confinante (> 500 kPa) la conductividad hidráulica de los GCLs prehidratados con una variedad de lixiviados y agua es independiente de la composición del fluido.

Comportamiento real a largo plazo. Experiencias en lisímetros. El efecto conjunto de los ciclos de humectación/secado y el intercambio catiónico sobre la permeabilidad

Se ha sugerido que los geocompuestos de bentonita ofrecen una protección superior que las capas de material mineral compactado, ya que las grietas que se forman en un geocompuesto de bentonita durante su desecación pueden cerrarse cuando se hidratan posteriormente, debido al alto potencial de hinchamiento de la bentonita. Un GCL instalado en el sellado de un vertedero o en un proyecto de remediación de suelos puede estar sometido alternativamente a procesos de humectación y secado. Sin embargo, los efectos de la desecación sobre la conductividad hidráulica de los geocompuestos de bentonita que se han observado son variados:

- Probablemente el primer caso analizado ocurrió en un cubeto de contención de fugas de depósitos petrolíferos en Shoreham (New York) cuando en el invierno de 1990-1991 se observó que, a diferencia de años anteriores, ya no se formaban charcos de agua de lluvia su interior. Dicha cubeto estaba impermeabilizado mediante un geocompuesto de bentonita instalado bajo una capa de dolomita (carbonato cálcico-magnésico) de poco espesor. La explicación dada es que el agua de lluvia, de carácter ácido, al percolar a través de la dolomita disolvió de ésta Ca^{2+} y Mg^{2+} , pasando al agua, desde donde se intercambiaron con el Na^+ de la bentonita, causando un incremento en la permeabilidad del geocompuesto de bentonita. La solución adoptada fue reemplazar el geocompuesto de bentonita dañado y cubrirlo con otro tipo de material. Mientras que en otros cubetos de esta instalación donde se observó este mismo fenómeno se utilizó otra solución: extender carbonato sódico (Na_2CO_3) sobre la dolomita, el cual repuso el Na^+ perdido por la bentonita, reduciendo la permeabilidad del geocompuesto de bentonita sin tener que cambiarlo (Dobras & Elzea, 1993).
- Shan & Daniel (1991) sometieron en laboratorio pequeñas muestras de Claymax[®] 200R a varios ciclos de humectación/secado, observado la formación de un intenso agrietamiento al desecarse, pero al volver a humedecerse recuperaban la baja conductividad hidráulica que tenían en el primer ciclo de humectación.

Estos autores también encontraron que los pequeños punzonamientos realizados en un GCL seco pueden llegar a cerrarse cuando se humedece y la bentonita se hincha.

- Boardman & Daniel (1996) realizaron ensayos de laboratorio sobre los efectos de los ciclos de humectación/secado sobre la conductividad hidráulica de tres geocompuestos de bentonita: Claymax 200R, Bentomat y Gundseal.

Para lo cual utilizaron un permámetro de grandes dimensiones (ver descripción en Estornell & Daniel, 1992) en el que instalaron una muestra intacta (sin superponer paneles) de Claymax[®] 200R bajo 30 cm de agua y una presión de confinamiento de 7,7 kPa producida por una capa de 60 cm de grava. Al cabo de 3 semanas observaron salida de agua a su través con un flujo estacionario que permitió determinar su permeabilidad saturada inicial en 6×10^{-11} m/s -similar a la obtenida por LaGatta (1992): 7×10^{-11} m/s - 8×10^{-11} m/s-. A continuación secaron el GCL inyectando un chorro de aire caliente, lo que causó la desecación de la bentonita del geocompuesto hasta una humedad del 12 % y un intenso agrietamiento. Cuando sobre el geocompuesto en este estado se vertió agua (40 mm/h, equivalente a una lluvia intensa), ésta pasó inmediatamente a su través. En ese momento su permeabilidad fue de 2×10^{-5} m/s (figura 1a), y a partir de ese momento fue disminuyendo gradualmente a medida que la bentonita se expandía. Así, 90 minutos más tarde había descendido a

1×10^{-7} m/s, y tres días más tarde se había estabilizado en un valor de 1×10^{-10} m/s (figura 1b), ligeramente superior al inicial ($0,6 \times 10^{-10}$ m/s). El GCLs exhumado presentaba la misma apariencia que uno que no había sido desecado. Este comportamiento era similar al observado por Shan & Daniel (1991) sobre pequeñas muestras de este mismo tipo de GCL.

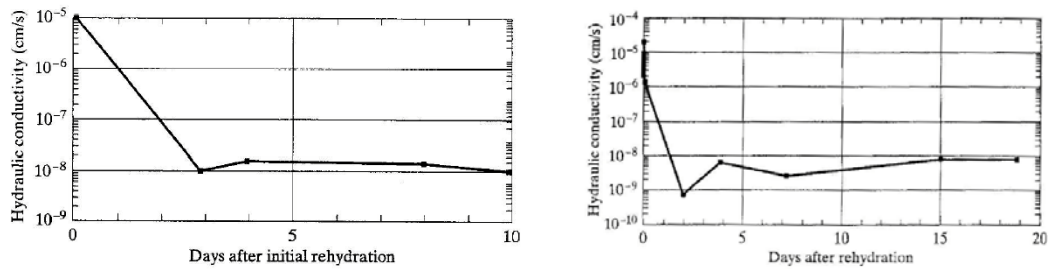


Figura 1. Evolución temporal de la conductividad hidráulica del Claymax® 200R desecado (muestra única sin uniones solapadas) desde el momento de su rehidratación: a) Evolución a corto plazo, b) Evolución a largo plazo (Boardman & Daniel, 1996).

Boardman & Daniel (1996) mantienen que el valor inicialmente alto de la conductividad hidráulica del GCL desecado mostrado en la figura 1 puede no ser representativo de las condiciones reales en campo, donde el suelo de cobertura puede retener parte de la lluvia y causar un humedecimiento más gradual del GCL. Además, la velocidad de rehidratación de 40 mm/h utilizada en este ensayo correspondería a una infiltración extrema, y para que ese valor se obtuviese en campo, el GCL tendría que haber sido recubierto por un material extremadamente permeable (p.e. gravas) o enterrado muy superficialmente. Estos autores piensan que si el GCL se humedece lentamente (lo que ocurriría en la mayoría de los casos en campo), tendría tiempo para adsorber agua e hincharse sin permitir el flujo de agua a su través. El significado de esta alta conductividad hidráulica inicial sólo debe ser considerada en el marco de dicha investigación.

El mismo experimento se repitió con paneles de Claymax® 200R superpuestos 23 cm. Durante la primera humectación algo de agua permeó a su través pero sin alcanzar un flujo estacionario en 3 semanas. A cabo de las cuales se supuso que el GCL esta saturado, por lo que se procedió a su secado e inmediata rehidratación. Durante las primeras 3 horas de la hidratación su conductividad hidráulica fluctuó entre 1×10^{-7} m/s y 1×10^{-8} m/s. Al cabo de 19 días se estabilizó en 7×10^{-11} m/s.

Este mismo experimento se repitió con Bentomat. En el caso de la muestra intacta (sin superponer paneles) no se observó flujo de agua ni durante la primera humectación, ni tras la desecación. En el caso de las muestras con paneles superpuestos la permeabilidad fue de 1×10^{-11} m/s antes y después del secado, sin flujo apreciable inmediatamente tras la rehidratación.

Finalmente, el experimento se repitió con paneles superpuestos de Gundseal con la geomembrana dispuesta hacia arriba, sin apreciar flujo en la primera hidratación -como ya había observado Estornell & Daniel (1992) tras 5 meses de ensayo-, ni tras 3 semanas de la rehidratación tras la desecación. Al exhumarlo se pudo observar que en el solape una banda de bentonita de 2,5 cm - 5 cm de anchura se había hidratado, lo que había evitado el flujo a través del solape.

De lo que se concluye que un único ciclo de humectación/sacado no causa efectos significativos sobre la permeabilidad a largo plazo (unos días), pero es necesario que transcurran unos días para que la bentonita desecada adsorba el agua necesaria para expandirse completamente y recupere su baja permeabilidad inicial.

La capacidad de autosellado del GCL les confiere una potencialidad viable como barrera hidráulica en situaciones en que ésta puede sufrir ciclos de secado/humectación (por ejemplo, dentro de la secuencia de sellado final de un vertedero). Sin embargo, advierten que los resultados de estos ensayos no deben extrapolarse. Los citados ensayos se realizaron bajo condiciones cuidadosamente controladas con un único, aunque severo, ciclo de secado/humectación, el cual no es probable que ocurra en campo, donde es más probables la ocurrencia de numerosos ciclos de secado/humectación, pero menos severos. También advierten que es necesaria más investigación (en particular datos de campo) antes de llegar a una conclusión sobre la capacidad de los GCLs de resistir a numerosos ciclos de secado/humectación bajo el amplio rango de posibles condiciones de campo. No obstante, estos resultados son esperanzadores y sugieren que los GCLs puede ser un material atractivo cuando

se prevea que la barrera hidráulica va a estar sometido a algún grado de ciclicidad en su contenido en humedad.

Lin & Benson (2000) sugieren que Boardman & Daniel (1996) no llegaron a observar un aumento en la conductividad hidráulica ya que solo realizaron un único ciclo de secado y el agua que utilizaron tenía una concentración de cationes divalentes más baja que la habitual en las aguas intersticiales naturales.

A continuación se presentan los datos de campo que reclamaban Boardman & Daniel (1996).

- James et al. (1997) exhumaron un sellado formado por la siguiente secuencia de capas (de arriba abajo) para determinar las causas de la excesiva percolación que presentaba:

- 30 cm de suelo.
- 15 cm de gravas como capa drenante.
- Geocompuesto de bentonita sódica.
- Suelo arcilloso compactado.

El GCL exhumado presentaba un alto contenido en humedad (116 %), pero con zonas con fisuras finas. No se determinó su conductividad hidráulica. La montmorillonita contenida en el GCL exhumado contenía una media de 10,3 cmol^+/kg de Na^+ y 81,6 cmol^+/kg de Ca^{2+} , mientras que el GCL original presentaba 60,4 cmol^+/kg de Na^+ y el 40,9 cmol^+/kg de Ca^{2+} . Lo que indica que gran parte del Na^+ de la bentonita original había sido reemplazado por Ca^{2+} , sugiriendo que éste último procedía:

- a) del 2 % de calcita contenida en la bentonita,
- b) de la disolución del suelo suprayacente, de naturaleza calcárea, por la lluvia infiltrada,
- c) del agua utilizada inicialmente para hidratar el GCL que contenía unos 0,003 M de Ca^{2+} .

- A mediados de la década de 1990, en Alemania se iniciaron una serie de ensayos de campo para investigar el comportamiento a largo plazo y bajo condiciones reales de diferentes diseños y materiales (entre ellos los GLCs) en sellados de vertederos, con instalación de grandes lisímetros para medir la infiltración de agua a su través.

- Así, sobre el sellado del vertedero de residuos urbanos de Georgswerder (Hamburgo, norte de Alemania) se instalaron en abril de 1994 sendos lisímetros de 100 m^2 . La base de estos lisímetros estaba formada respectivamente por Bentofix D3000 (lisímetro B1) y NaBento (lisímetro B2)., Además, se instalaron otros tres GCLs (Bentomat, Claymax SP 500 y Gundseal con la geomembrana hacia arriba) en las parcelas de 3 m \times 2 m, pero sin un lisímetro bajo ellos. Los cinco tipos de GCLs se instalaron siguiendo la siguiente secuencia de capas (de abajo a arriba):

- 30 cm de tierra vegetal formada por arena franca con un 4 % de materia orgánica, sobre la que se sembró hierba.
- 15 cm de gravas (con un diámetro entre 1 y 8 mm) como capa drenante.
- Geocompuesto de bentonita.
- 10 cm de gravas.
- Geomembrana de PEAD de 1,5 mm de espesor. Forma parte del sellado de vertedero y constituye la base del lisímetro.

Los motivos de utilizar un recubrimiento de tan poco espesor sobre los GCLs eran (Melchior, 1997, 2002) que, por un lado, se había propuesto ese diseño para el sellado de suelos contaminados en la zona, y que por otro permitía asegurar -según los cálculos de Melchior (1993)- que las raíces de las plantas y la desecación afectasen a los GCLs dentro de la duración inicialmente asignada al proyecto de investigación, pese a que el apartado 10.4.1.4 de la instrucción técnica alemana sobre el depósito de residuos (TA-Siedlungsabfall) de 1993 requería un espesor $> 1,3$ m por encima de la geomembrana del sellado de un vertedero de residuos no peligrosos.

Al instalar una capa drenante bajo los 30 cm de tierra vegetal, ésta última, por drenaje gravitacional, perdía rápidamente el agua, lo que obligaba a las raíces de las plantas a profundizar en busca de agua. Este comportamiento de las plantas es aprovechado para el diseño de los campos de deportes sobre hierba.

En el momento de la instalación de los GCL (abril de 1994) su humedad media era del 10,4 %. En noviembre de 1994, el Bentomat había incrementado su humedad al 138 % y el Claymax al 152 %, por lo que se puede considerar que se habían hinchado. En ese primer invierno (figura 2) la

infiltración a través de los GCLs fue prácticamente insignificante (0,0 mm a través del Bentofix D3000 y 5,2 mm a través del NaBento), lo que implica un comportamiento excelente y demuestra que fueron instalados correctamente.

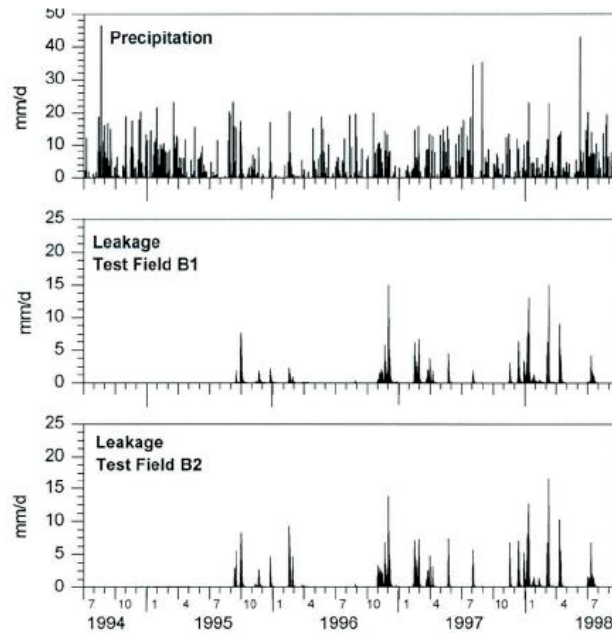


Figura 2. Evolución temporal de la precipitación y la infiltración en los lisímetros B1 y B2 hasta septiembre de 1998 (Melchior, 2002).

Como consecuencia del verano especialmente seco que sufrió Hamburgo en 1995, la humedad descendió al 5 % en la capa de suelo vegetal, al 1 % en la capa drenante, al 29 % en el Bentomat y al 37 % en el Claymax, con formación de grietas de desecación de > 2 mm de anchura y 1 cm de espaciado. El verano de 1995 finalizó con unas intensas lluvias a finales de agosto, que sirvieron para humedecer el suelo, y tras las lluvias de mediados de septiembre éste alcanzó su capacidad de campo y se produjo la primera infiltración significativa a través de los GCLs, situación que a partir de entonces se repetiría durante ese otoño-invierno tras cualquier aguacero importante. En el periodo sep-95 a dic-95 la infiltración acumulada a través de Bentofix D3000 fue de 45,2 mm y a través de NaBento de 69,6 mm, del orden de un 25 % de la precipitación, con valores > 1×10^{-7} m/s. Al parecer, los GCLs se habían agrietado durante el verano, y pese a que con las lluvias se humedecieron de nuevo hasta alcanzar una humedad por encima del 100 %, no se hincharon lo suficiente como para cerrar todas las grietas formadas durante el verano, a diferencia del comportamiento previsto a partir de las observaciones de laboratorio.

Según Melchior (1997) los primeros resultados indican que la estructura mineralógica de la bentonita se ha mantenido intacta, pero ha sufrido un amplio intercambio catiónico, con reemplazamiento de su Na^+ por Ca^{++} , y en consecuencia su capacidad de hinchamiento ha disminuido hasta los valores típicos de la bentonita cálcica.

La penetración de las raíces en los GCL ocurrió a los 5 meses de su instalación, y el agrietamiento generalizado de la bentonita se observó poco después del año de su instalación, con algunas grietas de 2 mm de anchura. Es más, se produjo un completo intercambio del Na^+ de la bentonita por Ca^{++} y el índice de hinchamiento de la bentonita era comparable al de una bentonita cálcica.

Los GCLs presentaban una conductividad hidráulica entre 1×10^{-X} m/s y 3×10^{-6} m/s y una humedad entre 55 % y 100 % (media = 60 %). En aquellos GCLs que tenían una humedad < 100 % se observaron grietas de desecación. La bentonita del GCL que incluía una geomembrana pegada a la capa de bentonita presentaba unas propiedades notablemente diferentes: presentaba una humedad mayor, un mayor índice de hinchamiento y había sufrido un menor intercambio catiónico, aunque éste no había sido impedido por la presencia de la geomembrana.

Periodo considerado	Precipitación mm	Percolación en B1		Percolación en B2	
		mm	%	mm	%
may-94 - oct-94	449	0	0,0	0	0,0
nov-94 - abr-95	580	0	0,0	6	1,0
may-95 - oct-95	315	31	9,8	42	13,3
nov-95 - abr-96	164	25	15,2	59	36,0
may-96 - oct-96	334	2	0,6	8	2,4
nov-96 - abr-97	331	138	41,7	158	47,7
may-97 - oct-97	438	14	3,2	25	5,7
nov-97 - abr-98	421	174	41,3	197	46,8
Total	3.032	384	12,7	495	16,3

Los GCLs fueron exhumados y examinados por varios institutos de investigación independientes. Visualmente se observaba que los GCLs habían sido atravesados por raíces. Mediante rayos X se observaron grietas en la bentonita. El contenido en agua de la bentonita, que *in situ* había superado el 150 %, había descendido en algunas zonas a entre 40 - 100 %. Los valores obtenidos del índice de hinchamiento, la capacidad intercambio catiónico y adsorción de agua eran considerablemente inferiores a las esperables en una bentonita sódica. La conductividad hidráulica determinada en laboratorio fue alta al principio de los ensayos debido a la presencia de grietas abiertas, las cuales se cerraron gradualmente cuando los ensayos se realizaron en células triaxiales de pared flexible.

Se concluyó que debido al insuficiente espesor de la capa de suelo que recubría los GCLs éstos sufrieron una severa desecación con formación de grietas. Al mismo tiempo, tuvo lugar un intercambio catiónico en la bentonita, donde la mayoría de los iones de Na^+ fueron reemplazados por Ca^{2+} , lo cual impidió su rápido autosellado. Además, la penetración de raíces también contribuyó al aumentar su permeabilidad y a reducir su humedad. En general, la desecación fue menos intensa en las zonas de solape entre paneles de GCLs, donde el GCL superior había protegido al GCL inferior de la desecación.

Por lo tanto, los GCLs no funcionan satisfactoriamente cuando son sometidos a condiciones adversas como las que se dieron en el sellado de este vertedero: una capa de suelo de recubrimiento demasiado delgada y con una baja capacidad de retención de agua (= capacidad de campo - punto de marchitez), las raíces de las plantas penetrando el GCL, una capa granular drenante inmediatamente sobre el GCL, veranos extraordinariamente secos y cálidos, y elevadas temperaturas dentro de la masa de residuos. Pero, como indican Gartung & Zanzinger (1998), estas situaciones no concurren habitualmente en el sellado de un vertedero o pueden ser evitadas con un diseño apropiado, y por lo tanto, a su juicio, lo sucedido en este vertedero deber ser considerado más como un ensayo fallido que como un caso histórico.

- En el verano de 1997 se exhumaron los GCL del sellado del vertedero de residuos urbanos de Nuremberg (sur de Alemania) que habían sido instalados a finales de 1994. Dicho sellado consistía en la siguiente secuencia de capas (de arriba a bajo):
 - 0,75 m de arena ligeramente limosa, recubierta de hierba.
 - 0,15 m de gravas gruesas, como capa drenante.
 - 0,10 m de arena ligeramente limosa.
 - Geocompuesto de bentonita sódica natural.
 - Capa de arena ligeramente limosa.

Pese a haber sufrido dos veranos muy secos como en el caso del vertedero de Hamburgo anteriormente citado, en este caso no se detectaron grietas de desecación en el GCL (ni mediante rayos X), ni penetraciones de raíces y su humedad era del 100 %. Aunque los análisis mineralógicos revelaron un intercambio catiónico parcial de bentonita sódica a cálcica, su conductividad hidráulica no había aumentado respecto a los valores iniciales determinados antes de su instalación. Este comportamiento satisfactorio es atribuido por Gartung & Zanzinger (1998) al gran espesor y capacidad de retención de agua de la cubierta de suelo y al hecho de que la capa de arenas limosas que recubrían superior e inferiormente el GCL reducen la tendencia a secarse de la bentonita saturada, a diferencia de aquellos diseños que colocan una capa de drenaje inmediatamente sobre el GCL, lo que favorece su desecación.

Tras los comportamientos observados en los sellados de los vertederos de Nuremberg y Hamburgo, Gartung & Zanzinger (1998) señalan que el DIBt (*Deutsches Institut für Bautechnik*, Instituto Alemán de Tecnología de la Construcción) emitía los siguientes consejos con respecto a los sellados de vertederos para prevenir el agrietamiento por desecación de los GCLs:

- Los GCLs se instalarán formando capas dobles, de modo que la capa superior proteja a la inferior contra la desecación. Se permiten otros tipos de protecciones, siempre y cuando se demuestre su eficacia contra la desecación.
 - El suelo inmediatamente sobre el GCL y bajo él debe tener unas características tales que impidan la desecación del GCL (cumplen este requisito las arenas limosas).
 - La capa de suelo de cobertura del sellado debe tener al menos 1 m de espesor y ha tener la suficiente capacidad de almacenamiento de agua.
- Henken-Mellies et al. (2001) han determinado la infiltración a través de GCLs instalados en 1995 en el sellado de vertederos alemanes bajo una capa drenante y 1 m de suelo de cobertera:

GCL	Periodo considerado	Precipitación mm	Permeación	
			mm	%
1	1996	713	1,5	0,2
	1997	1.037	6,4	0,6
	1998 (hasta sept.)	493	3,8	0,8
2	1994 - 1997 (parte)	2.402	43,1	1,8

Obteniendo que estos materiales presentan una permeabilidad menor que las capas de suelo arcilloso compactado.

- Lin & Benson (2000) estudiaron en laboratorio el efecto de los ciclos de humectación/secado sobre la conductividad hidráulica y la capacidad de hinchamiento de un geocompuesto de bentonita sódica. Utilizaron para ello un geocompuesto de bentonita agujado de $7,5 \text{ kg/m}^2$ que humedecieron bien con agua desionizada o bien con una solución $0,0125 \text{ M}$ de CaCl_2 , representativa del agua intersticial en el suelo de Wisconsin. Los ensayos de conductividad hidráulica se realizaron sobre especímenes de GCL que habían sido permeados repetidamente y luego mantenidos en aire seco hasta que perdían el agua aportada, momento en que su peso se estabilizaba, lo cual ocurría cuando su humedad estaba entre 15 % y 20 %. Los ensayos de índice de hinchamiento se realizaron sobre la bentonita que había sido humectada y secada. En todos los especímenes hidratados con la solución de CaCl_2 se observó que a los 4-5 ciclos de humectación/secado el índice de hinchamiento disminuía hasta los valores típicos de la bentonita cálcica, mientras que los especímenes hidratados con agua desionizada el índice de hinchamiento aumentaba con el número de ciclos de humectación/secado aplicados. Todos los especímenes mantuvieron una conductividad hidráulica baja (10^{-11} m/s) durante los 4 primeros ciclos de humectación/secado. En los siguientes ciclos humectación/secado, el espécimen hidratado con agua desionizada mantuvo una baja conductividad hidráulica, pero los especímenes hidratados con la solución de CaCl_2 incrementaron su conductividad hidráulica en aproximadamente 3 órdenes de magnitud ($> 10^3 \text{ m/s}$). La explicación es que en la bentonita se produce una sustitución del sodio por cationes del agua intersticial del suelo, esto dar lugar a una disminución de la capacidad de hinchamiento de la bentonita, de tal modo que el hinchamiento producido durante la rehidratación no suficiente para cerrar todas las grietas de desecación formadas.

En algunos casos la bentonita fue hidratada con agua desionizada o con agua del grifo durante el primer ciclo de humectación a fin de determinar el efecto que tiene la primera exposición sobre la prevención del daño a la bentonita. Sin embargo, esos especímenes se comportaron de la misma manera que los hidratados con la solución de CaCl_2 .

- Mansour (2001) exhumó unos geocompuestos de bentonita sódica (no se citan sus características) que habían permanecido 5 años enterrados bajo 66 cm de suelo arenoso bien clasificado con algunos finos en un área semiárida de Bakersfield (California) y determinó que su conductividad hidráulica saturada al agua desionizada era de $1,9 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ bajo una presión confinante de 35 kPa y su índice de hinchamiento medio era de 33 mL/2g, valor muy similar al del producto original. En el agua intersticial de los GCL y del suelo de cobertura predominaba el sodio. El hecho de que la capa de suelo de cobertura fuese rica en sodio previno el intercambio catiónico observado en otros lugares.

- Egloffstein (2001, 2002) analiza el estado de una serie de geocompuestos de bentonita exhumados en el sellado de vertederos alemanes. Observó que su humedad oscilaba entre 40 - 120 % y que se había producido un completo intercambio catiónico del Na^+ por Ca^{2+} en tan sólo 2 años. Egloffstein (2001) humedeció un espécimen nuevo de geocompuesto de bentonita con agua desionizada y posteriormente lo sometió a una solución de CaCl_2 , la cual causó que su conductividad hidráulica aumentase hasta 3×10^{-10} m/s -un valor considerablemente menor que el de los especímenes exhumados-, de lo que concluye que estos últimos habían sufrido una combinación de intercambio catiónico y grietas de desecación no selladas durante la rehidratación, tal y como sugieren Lin & Benson (2000). Egloffstein (2001) asegura que la presión de confinamiento proporcionada por una capa de recubrimiento $\geq 0,75$ m de suelo es suficiente para sellar las grietas de desecación y prevenir un gran incremento de la conductividad hidráulica, aunque no proporciona ningún dato que avale dicha afirmación. Sin embargo, posteriormente, encontraron que capas de recubrimiento de mayor espesor no son capaces de prevenir la desecación.

Egloffstein (2002) señala que la conductividad hidráulica de un GCL bajo una presión confinante de 20 kPa es de unos 10^{-7} m/s la primera vez que se humedece, pero al cabo de 20 días se reduce a unos 10^{-9} m/s. Egloffstein (2002) también señala que las grietas de desecación son más finas y más abundantes en los GCLs agujados que en los GCLs unidos por puntadas.

- Wagner & Schnatmeyer (2002) estudiaron durante dos años la percolación a través del sellado de un vertedero en Luxemburgo mediante un lisímetro de 45 m². La secuencia de sellado instalada fue la siguiente (de arriba a abajo):
 - 75 cm de arena limosa.
 - 25 cm de escoria de horno de arco eléctrico de tamaño grueso que actuaba como capa drenante,
 - Geocompuesto de bentonita sódica agujeteado-perforado,
 - Arena.

La idea subyacente a este diseño era que la arena y escoria actuaran como una barrera capilar a ambos lados del geocompuesto de bentonita para que se mantuviera la humedad dentro de ésta. Durante el primer año la percolación registrada fue mínima, pero el segundo año fue de 6 mm/año, con un pico de 0,072 mm/día. (Nota: es frecuente que la escoria de horno de arco eléctrico contenga cal libre en su interior).

- Henken-Mellies et al. (2002, 2004) instalaron en 1998 un lisímetro, de 520 m² de superficie, en el sellado del vertedero de residuos urbanos de Aurach (60 km al SW de Nuremberg, Baviera, Alemania), el cual presentaba la siguiente secuencia de capas (de arriba a abajo):
 - 0,20 m de suelo vegetal (arena franca) con alta capacidad de retención de agua.
 - 0,80 m de arena con bajo contenido en arcilla. (De esta manera se cumplían el requerimiento del Instituto Alemán de Tecnología de la Construcción (Deutsches Institut für Bautechnik, DIBt) de que la impermeabilización se encuentre bajo más de 1 m de suelo).
 - Un geocompuesto drenante con una transmisividad de 0,7 L/(s m) bajo una presión de confinamiento de 20 kPa y un gradiente hidráulico $i = 0,1$.
 - Un geocompuesto de bentonita. Se eligió una bentonita cálcica para evitar los problemas detectados por otros autores (como Egloffstein, 2000) con la bentonita sódica, y para compensar se utilizó un producto con mayor masa por unidad de superficie (9500 g/m²).
 - Una capa de regularización formada por arena limosa

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Periodo considerado	Precipitación mm	Esc. superficial		Drenaje		Percolación		ET	
		mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
nov-98 - mar-99	305,5	25,2	8,2	239,6	78,4	7,0	2,3	33,7	11,0
abr-99 - sep-99	537,7	1,2	0,2	23,7	4,4	0,3	0,1	512,5	95,3
oct-99 - mar-00	525,3	3,2	0,6	228,0	43,4	1,8	0,3	292,3	55,6
abr-00 - sep-00	354,8	0,4	0,1	45,8	12,9	1,5	0,4	307,1	86,6
oct-00 - mar-01	538,3	2,4	0,4	243,9	45,3	3,0	0,6	289,0	53,7
abr-01 - sep-01	565,1	0,7	0,1	65,9	11,7	1,2	0,2	497,3	88,0

Total	2.826,7	33,1	1,2	846,9	30,0	14,8	0,5	1.931,9	68,3
--------------	---------	------	-----	-------	------	------	-----	---------	------

Notas: Porcentaje respecto a la precipitación registrada en el periodo considerado (100 %).

La toma de datos se inicia a finales de noviembre de 1998, por lo que los registros del primer semestre no están completos.

La evapotranspiración (ET) está calculada como diferencia entre las entradas (precipitación) y las otras salidas (la escorrentía superficial, el drenaje de la infiltración en el suelo a través del geocompuesto de drenaje y la percolación a través del GCL), por lo que puede tener errores si la variación de almacenamiento en el suelo no es despreciable durante el periodo considerado. El lisímetro estaba instalado en un talud con una inclinación de 20° hacia el sur. Dado que la latitud del emplazamiento es de 49 °N resulta que recibe una irradiación solar elevada, lo que hace que la evapotranspiración sea elevada

El primer invierno la escorrentía superficial fue apreciable y la evapotranspiración (ET) muy pequeña respecto a otros inviernos, debido a que la cubierta vegetal todavía era escasa. Una vez que la cubierta vegetal se desarrolló, la escorrentía superficial en invierno se redujo considerablemente (recordar que el suelo arenoso instalado favorece la infiltración) y la ET se hizo significativa, menor en invierno (53 - 55 %) que en verano (86 - 95 %), como era de esperar. La percolación a través del GCL se limita a unos pocos días del año, con valores entre 0,2 mm/día a 1,6 mm/día, coincidiendo con los días en que el drenaje de la infiltración en el suelo supera los 5 mm/día, lo cual ocurre un par de veces en invierno. El mayor drenaje se produjo en marzo de 2001 con 21 mm/día. La percolación media a través del GCL durante los tres años de observación fue de 5,4 mm/año, aunque con valores diarios tan altos como 1,7 mm/día ($= 2 \cdot 10^{-8}$ m/s).

Los sensores de humedad instalados junto al GCL mostraron que éste sufrió considerables variaciones de humedad pese a estar enterrados a 1 m de profundidad, con contenidos más altos durante la primavera y comienzos del verano.

- Blümel et al. (2002) analizan el comportamiento de tres geocompuestos de bentonita sódica natural durante tres años bajo 1 m de arena limosa en otros tantos lisímetros instalados en Lemförde (Alemania). El clima en el lugar es húmedo con veranos secos. Si bien los análisis mineralógicos realizados sobre la bentonita exhumada mostraron que prácticamente se había completado el intercambio del Na^+ de la bentonita por Ca^{2+} , no observaron un incremento significativo en la percolación a través del geocompuesto de bentonita, ni un agrietamiento significativo por desecación u otros defectos, por lo que concluyen que la desecación de la bentonita durante los periodos secos no fue severa.
- Dwyer (2003) analiza el comportamiento de un sellado de vertedero en el árido clima de Albuquerque (New Mexico), formado por la siguiente secuencia de capas (de arriba a abajo):
 - 0,60 m de tierra vegetal.
 - Geotextil.
 - Capa de drenaje granular formada por arena
 - GCL.

Entre 1997 y 2002 se controló del flujo a través de la GCL, encontrándose un incremento del flujo entre 1997 y 1999, que luego disminuyó. En 2003 se exhumo el GCL y se determinó su conductividad hidráulica saturada, advirtiéndose que se había incrementado cuatro órdenes de magnitud.

- Mackey & Olsta (2004) exhumaron los geocompuestos de bentonita sódica del sellado de dos vertederos de la costa atlántica de Florida, los cuales habían permanecido durante más de 5 años bajo una capa de suelo formada por entre 0,61 y 0,81 m de arena limpia en el vertedero Alfa, y por entre 0,46 y 0,86 m de arena limosa en el vertedero Beta, y ambos suelos contenían fragmentos de conchas (una posible fuente de Ca^{2+}). En ambos emplazamientos, la bentonita estaba húmeda (aunque no se determinó su contenido en humedad) y presentaba algunas raíces. Los análisis realizados mostraron que casi todo el Na^+ de la bentonita había sido reemplazado por Ca^{2+} y Mg^{2+} -cationes predominantes en la capa de suelo- y que su índice de hinchamiento se encontraba entre 7,5 y 14 mL/2g, todo ello indicativo de que había sufrido un intercambio catiónico. La conductividad hidráulica del geocompuesto de bentonita exhumado en el vertedero A se encontraba entre $8,5 \times 10^{-11}$ m/s y $6,4 \times 10^{-8}$ m/s, obteniendo un laboratorio independiente los valores más altos (media = $1,2 \times 10^{-8}$ m/s) y su fabricante los más bajos (media = $1,4 \times 10^{-10}$ m/s). Mientras que en el vertedero B se obtuvieron valores inferiores, entre $3,5 \times 10^{-11}$ y $2,3 \times 10^{-10}$ m/s.
- Renken et al. (2006) describen el comportamiento de GCLs en dos lisímetros construidos en 2002 cerca de Stewart (British Columbia, Canadá), donde la precipitación anual supera los 2200 mm/año,

para evaluar su funcionamiento en el sellado de balsas que contienen residuos mineros generadores de aguas ácidas, el cual tiene como objetivo reducir la entrada de agua y oxígeno a dichos residuos para limitar la oxidación de los sulfuros que contienen. Los lisímetros, de 11,5 m x 15 m, estaban formados por la siguiente secuencia de capas (de arriba abajo):

- 0,05-0,10 m de tierra vegetal sembrada con una mezcla de herbáceas y leguminosas.
- 0,25-0,35 m de arena gruesa y grava.
- 0,10-0,15 m de arena fina.
- Un GCLs (Bentomat® ST)
- 0,1-0,15 m de arena fina.
- 0,75 m de finos mineros potencialmente generadores de aguas ácidas.

El segundo verano (2004) Renken et al. (2006) observan:

- 1) Concentraciones de oxígeno dentro los residuos, en 2 de los 3 perfiles realizados, lo suficientemente altas como para dar lugar a la oxidación de los sulfuros.
- 2) La escorrentía sobre el GCL y la infiltración a su través es intermitente.
- 3) Algunos de las muestras de GCL exhumadas presentan valores de entrada de aire < 10 kPa, lo que indica que es susceptible a la desecación. Se estima que la conductividad hidráulica de la GCL está entre $1 \cdot 10^{-10}$ y $2 \cdot 10^{-10}$ m/s.

e infieren que el GCL se han desecado al menos parcialmente, pese a la alta pluviometría anual. A la vista de la granulometría del suelo de cobertura del GCL se puede deducir que éste es era bastante permeable y poco capaz de almacenar agua para aguantar el estiaje veraniego.

- En otoño de 1998 se instalaron en Alemania (ubicación no precisada) tres lisímetros dentro de anillos de hormigón de 2 m de diámetro, con la siguiente secuencia de capas (de arriba a abajo):
 - Capa de 1 m de espesor -de conformidad con la normativa alemana- formada por arena limosa con una permeabilidad $\approx 10^{-7}$ m/s y densidad $\approx 1,7$ t/m³.
 - Geotextil de separación de polipropileno no tejido agujado de 300 g/m².
 - Capa drenante de 0,2 m de espesor formada por gravas con un diámetro entre 4 y 8 mm. Las aguas que recoge son evacuadas y contabilizadas como drenaje subsuperficial.
 - Un GCL. En el lisímetro 1 se utilizo Bentofix® NSP 4900-1 con una masa por unidad de superficie de 4670 g/m², en el lisímetro 2 Bentofix® BFG 5000, y en lisímetro 3 un Bentofix® NSP 4900-3 de 4500 g/m². Todos ellos fabricados por NAUE GmbH & Co. KG.
 - Capa drenante formada por grava de 2 a 8 mm de diámetro que recoge las aguas infiltradas a través de los GCLs.

En los primeros tres años, el crecimiento de las raíces en la capa de suelo de cobertura ocasionó un aumento de volumen tal, que el suelo rebosaba los bordes del lisímetro, por lo que fue necesario recrecer éstos 5 cm.

En el verano de 2001 se instalaron otros 3 lisímetros (denominados 4, 5 y 6) con una capa de suelo de cobertura del mismo tipo que el lisímetro 3 (arena limosa con una permeabilidad $\approx 10^{-7}$ m/s) pero con un espesor menor (entre 0,65 m y 0,85 m) y con una capa de drenaje sobre el GCL formada por un geocompuesto drenante en vez los 0,2 m de espesor gravas de los tres primeros lisímetros, por lo que los GCLs de estos tres nuevos lisímetros (del tipo Bentofix® NSP 4900-1 antes citado) están sometido a una presión de confinamiento menor que los tres lisímetros iniciales.

En julio de 2002 se retiró la vegetación y se reemplazó el suelo de lisímetro 1, instalando arena sin compactar (densidad $\approx 1,3$ t/m³) con una permeabilidad $\approx 10^{-3}$ m/s (medida en laboratorio) en sus 0,75 m inferiores, manteniendo el suelo existente en los 0,25 superiores. También se removió el suelo del lisímetro 2, retirando las raíces grandes y reinstalando el mismo suelo pero sin compactación (densidad $\approx 1,5$ t/m³ y permeabilidad $\approx 10^{-6}$ m/s). En el lisímetro 3 sólo se retiró la vegetación y las raíces cerca de la superficie. Puede decirse que se reinició el experimento.

Los datos registrados entre 1999 y 2007 (figura 3) muestran (Müller-Kirchenbauer et al., 2008):

- Que el porcentaje de lluvia que ha percolado a través de los GCL de los tres primeros lisímetros se encuentra entre 0,5 y 1,4 %.
- Que la instalación en julio de 2002 de un suelo más permeable en el lisímetro 1 tuvo como consecuencia que llegase más agua a la capa drenante sobre el GCL y que éste estuviera más

humedecido en verano, disminuyendo el flujo a su través. Debe tenerse en cuenta que las lluvias son frecuentes en el emplazamiento incluso en verano.

- Que a partir de 2005 el flujo a través de GCLs de los nuevos lisímetros se incrementó considerablemente respecto a los tres iniciales, indicativo de un aumento en su permeabilidad y una reducción en su capacidad de autosellado. Los autores no analizan las causas de éste comportamiento.

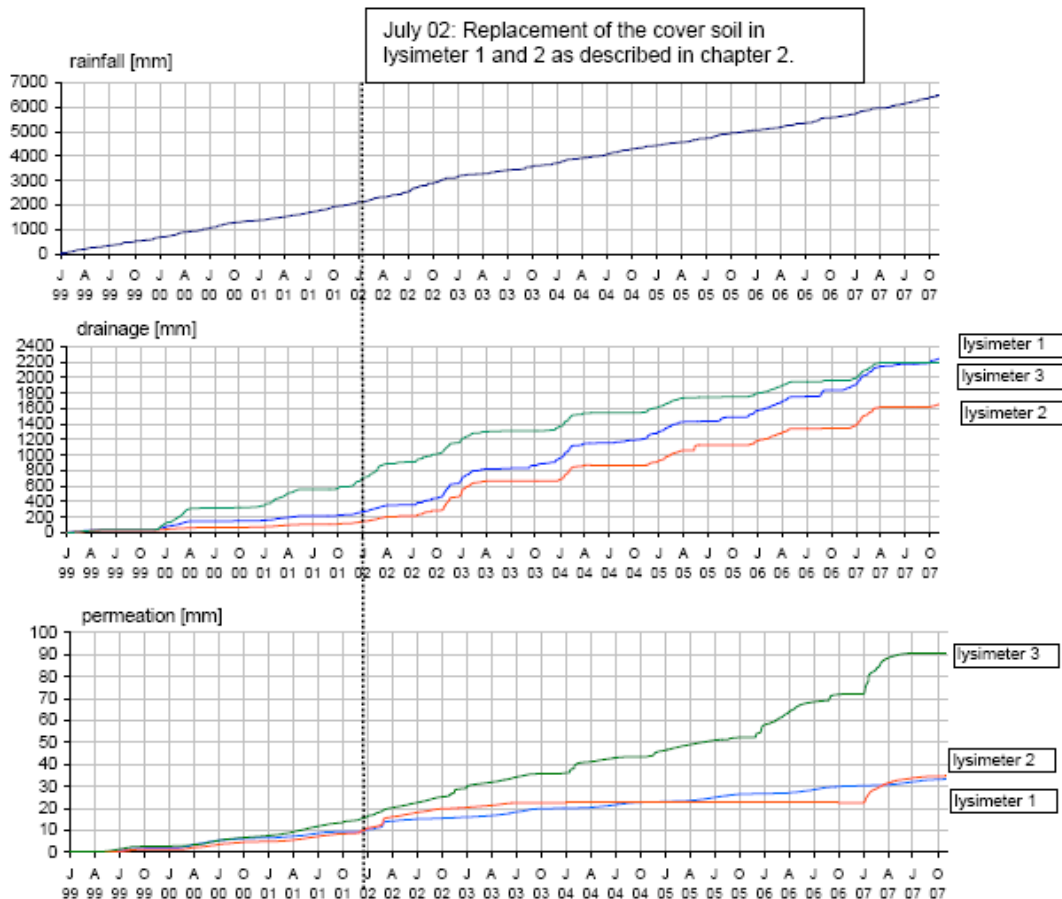


Figura 3. Valores medidos por Müller-Kirchenbauer et al. (2008).

Tampoco informan sobre composición del suelo o de las aguas intersticiales de éste, por lo que no puede determinarse si los resultados son extrapolables a otras situaciones y a cuales no.

- A mediados de 1996 se selló de un vertedero de cenizas volantes en el SW de Wisconsin (EE.UU.) utilizando la siguiente secuencia de capas (de arriba a abajo):
 - 15 cm de tierra vegetal.
 - 60 cm de tierras arcillosas de protección.
 - Un geocompuesto de bentonita sódica.
 - 60 cm de capa de apoyo formada por roca limosa.

El organismo autorizante requirió la instalación de dos lisímetros (denominados BL1 y BL2) dentro del sellado y la realización de determinaciones periódicas de la percolación a través de la capa de sellado. En la figura 4 se muestra la percolación acumulada registrada en ambos lisímetros.

Así, en el deshielo de la primavera de 1997 se detectó un aumento de la infiltración en el lisímetro BL2 (figura 4). En consecuencia, a mediados de 1997 se excavó el lisímetro para determinar la causa de este comportamiento y se observó un adelgazamiento del geocompuesto de bentonita por punzonamiento ocasionado por las partículas de grava instaladas bajo él.

La solución aplicada fue extender una capa de arena sobre la grava, como protección, colocar un nuevo geocompuesto de bentonita y sobre éste el resto de las capas del sellado.

Tras esta reparación se continuó registrando la infiltración en los lisímetros. Al cabo de 15 meses (otoño de 1998) se volvió a detectar un nuevo incremento de la infiltración (ver figura 4). Se volvió a exhumar el geocompuesto de bentonita, comprobándose que la bentonita de su interior estaba seca y agrietada (ver foto 1).

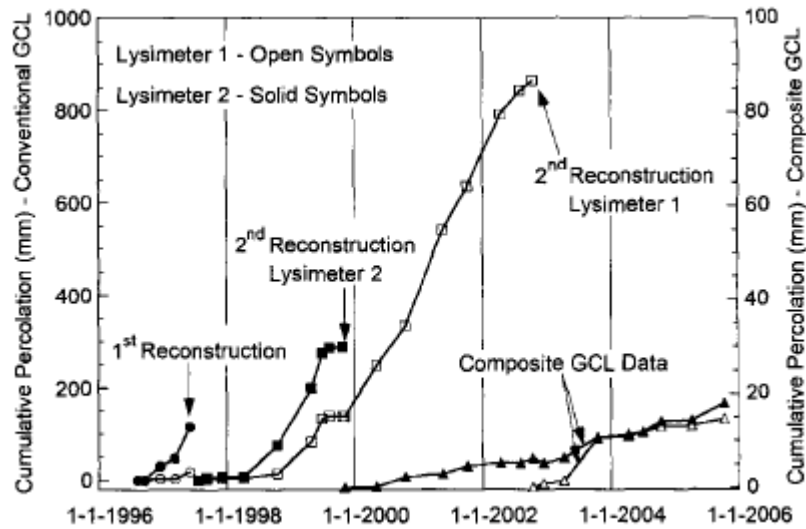


Figura 4. Evolución temporal de la percolación acumulada en los lisímetros 1 y 2 (Benson et al. 2007).



Foto 1. La bentonita dentro del geocompuesto se encontraba agrietada y seca (Benson et al. 2007)

Ante este estado de la bentonita, se decidió realizar un análisis del complejo de cambio de dicha bentonita -ensayo que en la exhumación anterior no se había considerado necesario-, el cual reveló que ésta presentaba una relación $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+ = 14$, mientras que en el geocompuesto de bentonita sódica original esta relación era de 1,4. Esto es, con el tiempo había aumentado 10 veces el contenido relativo en Ca^{2+} de la bentonita por reemplazamiento catiónico del Na^+ contenido originalmente en ésta.

A partir de la infiltración registrada en 1999 en los lisímetros se estimó que la conductividad hidráulica del geocompuesto de bentonita instalado se encontraba entre $3 \cdot 10^{-9}$ m/s y $7 \cdot 10^{-9}$ m/s. Valores muy similares al determinado en laboratorio sobre un espécimen del geocompuesto de bentonita exhumado ($2 \cdot 10^{-9}$ m/s). Lo que supone un aumento de 2 órdenes de magnitud respecto al producto original.

La expansión de la bentonita exhumada era comparable a la de una bentonita cálcica.

Todo ello sugiere que el citado intercambio catiónico redujo la expansividad de la bentonita, lo que impidió el cierre de las grietas desarrolladas en la bentonita tras la desecación sufrida durante el verano, tal y como habían observado anteriormente otros autores.

- Benson et al. (2007) indican que la infiltración registrada en un lisímetro construido en 1996 bajo el sellado de un vertedero situado en el SW de Wisconsin –precipitación media: 892 mm/año, evapotranspiración potencial: 838 mm/año- formado por la siguiente secuencia de capas (de arriba abajo):
 - 76 cm de arena limosa, con revegetación en superficie.
 - Un geocompuesto de bentonita sódica Claymax 200R, fabricado por CETCO.
 - 15 cm de arena limosa.
 - Residuos: cenizas volantes procedentes de una central térmica de carbón.

fue de hasta 450 mm/año en los 4 a 15 meses posteriores a su instalación. Como fue superior a la prevista (un máximo de 50 mm/año si el geocompuesto de bentonita tiene una permeabilidad de $2 \cdot 10^{-11}$ m/s y la capa de suelo de cobertura permanece completamente saturado), se decidió retirar el geocompuesto de bentonita instalado. En laboratorio se determinó que éste tenía una conductividad hidráulica alta, del orden de $5 \cdot 10^{-8}$ m/s, lo cual fue atribuido a la sustitución del Na^+ de la bentonita original por Ca^{2+} y Mg^{2+} procedente de la capa de suelo suprayacente, combinado con la deshidratación de la bentonita. Este geocompuesto de bentonita se sustituyó por otro (Claymax 600 CL) que tenía una lámina de polietileno de 0,1 mm de espesor adherida a la bentonita, y con él se registró una infiltración baja (entre 2,6 y 4,1 mm/año) durante más de 5 años.

- Meer & Benson (2007) encontraron en los GCLs exhumados en cuatro sellados de vertederos de Wisconsin incrementos similares en la conductividad hidráulica, causados por intercambio catiónico y grietas de desecación. En uno de los casos, el GCL había sufrido intercambio catiónico pese a que estaba cubierto por una GM y enterrado bajo 0,9 m de suelo, aparentemente asociado al agua intersticial de la subbase subyacente.

CONCLUSIONES

Todos estos resultados sugieren que en la mayoría de los casos ocurre un intercambio catiónico en la bentonita (a menos que los suelos sean sódicos, lo cual no es muy habitual) y un aumento en su conductividad hidráulica si su humedad desciende por debajo del 100 %. Al cabo de unos meses o unos pocos años el proceso se ha desarrollado tanto que el GCL permite un flujo de agua excesivo a su través, considerándose que han fallado en la misión que tenían encomendada.

Ninguna de las medidas de protección propuestas (cubierta de suelos de $\geq 0,75$ m de espesor, recubrimiento del GCL con una geomembrana) parece completamente efectiva para prevenir un considerable aumento de su conductividad hidráulica (Meer & Benson, 2007) y sería necesario investigar más para obtener métodos que:

- permitan diagnosticar compatibilidad química del medio donde se pretende instalar el GCL,
- prevengan su deshidratación.

BIBLIOGRAFÍA

- BENSON, C.H.; THORSTAD, P.A.; JO, H.-Y. & ROCK, S.A. (2007): “Hydraulic performance of geosynthetic clay liners in a landfill final cover”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 133, nº 7, pp. 814-827.
- BLÜNEL, W.; MÜLLER-KIRCHENBAUER, A.; REUTER, E.; EHRENBERG, H. & von MAUBEUGE, K. (2002): “Performance of geosynthetic clay liners in lysimeters”. En: *Clay Geosynthetic Barriers*, pp. 287-294, (eds.) H. Zanzinger, R.M. Koerner & E. Gartung, Ed. A.A. Balkema Publishers Swets and Zeitlinger (Lisse, The Netherlands).
- BOARDMAN, B.T. & DANIEL, D.D. (1996): “Hydraulic conductivity of desiccated geosynthetic clay liners”, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 122, nº 3, pp. 204-208.
- DOBRAŠ, T.N. & ELZEA, J. M. (1993): “In-situ soda ash treatment for contaminated geosynthetic clay liners”, En: *Proceedings of Geosynthetics '93*, (Vancouver, B.C., Canada), vol. 3, pp. 1145-1159, Ed. Industrial Fabrics Association International, (St. Paul, MN, USA).
- DWYER, S.F. (2003): “Water balance measurements and computer simulations of landfill covers”, Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, University of New Mexico (Albuquerque, New Mexico).

- EGLOFFSTEIN, T.A (2001): "Natural bentonites - Influence of the ion exchange and partial desiccation on permeability and selfhealing capacity of bentonites used in GCLs", *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 19, n° 7, pp. 427-444.
- EGLOFFSTEIN, T.A (2002): "Bentonite as sealing material in geosynthetic clay liners. Influence of the electrolytic concentration, the ion exchange and ion exchange, with simultaneous partial desiccation on permeability", En: *Clay Geosynthetic Barriers*, pp. 141-153, (eds.) H. Zanzinger, R.M. Koerner & E. Gartung, Ed. A.A. Balkema Swets and Zeitlinger, Lisse.
- ESTORNELL, P.M. & DANIEL, D.E. (1992): "Hydraulic conductivity of three geosynthetic clay liners", *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 118, n° 10, pp. 1592-1606.
- GARTUNG, E. & ZANZINGER, H. (1998): "Engineering properties and use of geosynthetic clay liners", En *Geotechnical Engineering of Landfills*, pp. 131-149, (eds.): N. Dixon, E.J. Murray & D.R.V. Jones, Ed. Thomas Telford Ltd. (London, UK).
- HENKEN-MELLIES, W.U.; GARTUNG, E. & DEFREGGER, F. (2001): "Long-term observation of the performance of a mineral landfill cover", En: *Proceedings of 8th International Waste Management and Landfill Symposium - Sardinia 2001*, vol. III, pp. 385-392.
- HENKEN-MILLIES, W.U. & GARTUNG, E. (2004): "Long-term observation of alternative landfill capping systems - Field tests on a landfill in Bavaria", *Land Contamination & Reclamation*, vol. 12, n° 1, pp. 1-8.
- HENKEN-MILLIES, W.U.; ZANZINGER, H. & GARTUNG, E. (2002): "Long-term field test of a clay geosynthetic barrier in a landfill cover system", En: *Clay Geosynthetic Barriers*, pp. 303-309, (eds.) H. Zanzinger, R.M. Koerner, & E. Gartung, Ed. A.A. Balkema Swets & Zeitlinger (Lisse, The Netherlands).
- JAMES, A.; FULLERTON, D. & DRAKE, R. (1997): "Field performance of GCL under ion exchange conditions", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 123, n° 10, pp. 897-901.
- KOLSTAD, D.; BENSON, C.H. & EDIL, T. (2004): "Hydraulic conductivity and swell of nonprehydrated geosynthetic clay liners permeated with multispecies inorganic solutions", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 130, n° 12, pp. 1236-1249.
- LaGATTA, M.D. (1992): "*Hydraulic conductivity tests on geosynthetic clay liners subjected to differential settlement*", MS thesis, University of Texas (Austin, Tex).
- LIN, L. & BENSON, C.H. (2000): "Effect of wet-dry cycling on swelling and hydraulic conductivity of GCLs", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. vol. 126, n° 1, pp. 40-49.
- MACKEY, R., & OLSTA, J. (2004): "Performance of geosynthetic clay liners used in two landfill closures in a coastal area of Florida", *Advances in Geosynthetic Clay Liners Technology: 2nd Symposium*, ASTM STP 1456, pp. 53-71, (eds.) R.E. Mackey & K. von Maubeuge, Ed. ASTM International (West Conshohocken, Pa).
- MANSOUR, R. (2001): "GCL performance in semiarid climate conditions", En: *Proceedings of 8th International Waste Management and Landfill Symposium - Sardinia 2001*, pp. 219-226, (eds.) T. Christensen, R. Cossu, & R. Stegmann, Ed. CISA (Cagliari, Italy).
- MEER, S.R. & BENSON, C.H. (2007): "Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final cover", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 133, n° 5, pp. 550-563.
- MELCHIOR, S. (1997): "In situ studies on the performance of landfills caps (compacted soil liners, geomembranes, geosynthetic clay liners, capillary barriers)", *Land Contamination & Reclamation*, vol. 5, n° 3, pp. 209-216. También en: *Proceedings of the 1997 International Containment Technology Conference* (St. Petersburg, Florida), pp. 365-373, Ed. U.S. Department of Energy, DuPont Company & U.S. Environmental Protection Agency (Germantown, Maryland, USA).
- MELCHIOR, S. (2002): "Field studies and excavations of geosynthetic clay barriers in landfill covers", En: *Clay Geosynthetic Barrier*, pp. 321-330, (eds.) H. Zanzinger, R.M. Koerner & E. Gartung, Ed. Swets and Zeitinger (Lasse).

- MÜLLER-KIRCHENBAUER, A.; BLÜMEL, W.& VON MAUBEUGE, K. (2008): “Long-term efficiency of GCLs with regard to natural drying and wetting cycles”, En: *EuroGeo4*, Paper n° 211, 8 pp.
- RENKEN, K.; YANFUL, E.K. & MCHAINA, D.M. (2006): “Geosynthetics research and applications in the mining and mineral processing environment”, 20 pp.
- ROWE, R.K. (2005): “Long-term performance of contaminant barrier systems”, *Géotechnique*, vol. 55, n° 9, pp. 631–678.
- SHAN, H.Y. & DANIEL, D.E. (1991): “Results of laboratory tests on a geotextile/bentonite liner material”, En: *Proceeding of Geosynthetics’91* (Atlanta), vol. 2, pp. 517-535, Ed. Industrial Fabrics Association International (St. Paul, Minn.).
- THIEL, R. & CRILEY, K. (2003): “Hydraulic conductivity of a GCL under various high effective confining stresses for three different leachates”, *Geosynthetics International*.
- U.S. EPA (1993): “*Report of Workshop on geosynthetic clay liners*”, EPA 600/R-93/171.
- WAGNER, J., & SCHNMMEYER, C. (2002): “Test field study of different cover sealing systems for industrial dumps and pollutes sites”, *Applied Clay Sciences*, vol. 21, pp. 99-116.