

Evaluación de hidrogeles para aplicaciones agroforestales

Evaluating hydrogels for agriforestry applications

Andrés Barón Cortés¹, Ingrid Xiomara Barrera Ramírez², Luis Francisco Boada Eslava³ y Gerardo Rodríguez Niño⁴

RESUMEN

Con hidrogeles sintetizados por medio de la técnica de polimerización en suspensión inversa (PSI), compuestos por acrilamida y acrilato de potasio entrecruzados con N, N' metilen-bis-acrilamida y que presentan diferentes comportamientos desde el punto de vista de capacidad y velocidad de hinchamiento, módulo elástico y propiedades de liberación, se estudia la modificación de las propiedades hidráulicas de un suelo tipo franco arcilloso realizando curvas de retención de humedad, empleando ollas de presión de plato cerámico, y se desarrollan montajes para evaluar la modificación en la retención de los mismos, ante condiciones de dosificación prolongada e instantánea de agua de irrigación. Adicionalmente, se realizan cultivos de acacia y rábano en fase vivero en suelos acondicionados con diferentes hidrogeles, en el primer cultivo se evalúa el retraso en la marchitez de la especie y en el segundo la diferencia en crecimiento; simultáneamente para los cultivos, se hace el seguimiento del contenido de humedad *in situ* del suelo con respecto al tiempo. Se logra un método para la medición del módulo elástico y las propiedades de liberación y se establece un modelo para predecir el comportamiento de los hidrogeles en el suelo con el conocimiento de sus propiedades básicas en el estado libre. Finalmente, los resultados muestran la bondad del uso de hidrogeles en estas aplicaciones: hay mayor facilidad de liberación y retención de agua aprovechable por el suelo, retraso notable del marchitamiento en condiciones hostiles, y es mayor el crecimiento de las especies, entre otros beneficios, además se establecen pautas para definir las características del hidrogel más adecuado dependiendo de la aplicación deseada y se realiza una proyección hacia la disminución del consumo de agua para el mantenimiento de un cultivo.

Palabras clave: hidrogeles, comportamiento hidráulico de suelos, retraso en marchitez de especies, incremento en crecimiento, disminución del consumo de agua.

ABSTRACT

Hydrogels synthesised by inverse suspension polymerisation (ISP) technique consisting of acrylamide and potassium acrylate interlinked with N, N' methylene-bis-acrylamide and presenting different behaviour in terms of rooting ability and speed, elastic module and release properties were studied. Markedly clayey soil properties were modified by drawing up moisture-retention curves using ceramic plate pressure waves and developing montages for evaluating modifications made to their retention, regarding prolonged and instantaneous irrigation-water dosage conditions. Acacia and radish crops were grown in nursery phase in soil conditioned with different hydrogels. Delayed specie withering was simultaneously evaluated in the first crop and difference in growth in the second one. Follow-up of *in situ* soil moisture content was also evaluated over a fixed period of time. A method was achieved for measuring elastic module and release properties and model was established for predicting hydrogel behaviour in soil having known basic properties in free state. The results revealed the usefulness of hydrogels in such applications: greater facility in usable water release and retention by soil, notable delay in withering in hostile conditions and greater growth of species. Guidelines were also established for defining the characteristics of hydrogel more adequately, depending on the desired application and a projection was made concerning reducing water consumption for maintaining a particular crop.

Keywords: hydrogel, hydraulic soil behaviour, delayed species withering, increased growth, reduced water consumption.

Recibido: diciembre 22 de 2006

Aceptado: octubre 16 de 2007

¹ Ingeniero químico, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Estudiante de Maestría en Administración de Empresas. andresbaroncortes@hotmail.com, afbeer@gmail.com

² Ingeniera química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Especialista en proyectos en ingeniería. ixbarrerar@unal.edu.co

³ Ingeniero químico. Profesor asistente, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. lfboadae@unal.edu.co

⁴ Ingeniero químico. M.Sc., Ph.D. Profesor asociado, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. grodriguezr@unal.edu.co

Introducción

Los hidrogeles son materiales poliméricos superabsorbentes, son sólidos granulares caracterizados por tener estructura tridimensional entrecruzada de cadenas flexibles (Okay, 2000; Barón *et al.*, 2005). En contacto con agua, esta se desplaza hacia el interior de la partícula de hidrogel, dada la menor actividad de agua que allí se presenta; a medida que el agua se difunde, la partícula incrementa su tamaño y las cadenas poliméricas se mueven para acomodar las moléculas de agua, simultáneamente, la presencia de puntos de entrecruzamiento evita que las cadenas en movimiento se separen y por tanto se disuelvan en el agua. Recientemente se cuenta con aplicaciones de estos materiales en productos de higiene personal (Buchholz y Graham, 1998), agricultura, forestales y horticultura (Buchholz y Graham, 1998; Mohana y Padmanabha, 2001; Mohana *et al.*, 2001; Penagos y Quintero, 1999; Kiatkamjornwong y Phunchareon, 1999) acondicionamiento de suelos (Buchholz y Graham, 1998), liberación controlada de fármacos (Katime *et al.*, 1999; Beltrán y Forero, 2001; Bueno y Chamorro, 2002; Ditta y Pinilla, 2002), materiales de construcción, cableado eléctrico y sensores (Buchholz y Graham, 1998; Okay, 2000), entre otras aplicaciones.

En la aplicación agrícola usualmente se emplean hidrogeles con alta proporción de acrilamida con el fin de evitar la reducción de capacidad de hinchamiento que se observa en hidrogeles de alto contenido de acrilato (características iónicas) cuando se encuentran con los cationes multivalentes que normalmente están en el suelo o en el agua de irrigación (Buchholz y Graham, 1998; Omidian, 1998).

Los suelos que reciben poca lluvia o irrigación o son demasiado porosos para retener la humedad en la zona de las raíces, se benefician notablemente con el uso de hidrogeles. Adicionalmente, en suelos arcillosos los hidrogeles ayudan a mejorar el contenido de aire del suelo dado el proceso de expansión que se genera por los ciclos de absorción-liberación del material (Buchholz y Graham, 1998; Kazanskii y Dubrovskii, 1992). Kazaanskii y Dubrovskii (1992) presentaron estudios acerca de la influencia de los hidrogeles sobre las características de los suelos.

Los polímeros superabsorbentes han mostrado resultados positivos en germinación, producción y supervivencia de repollos y maíz (Buchholz y Graham, 1998), donde se han alcanzado incrementos en la producción hasta del 10% con el empleo de la misma cantidad de agua. En palma se han encontrado resultados muy positivos también (Buchholz y Graham, 1998), en condiciones de escasez de agua. A pesar de que en las aplicaciones forestales se consume la mayor cantidad de los hidrogeles para aplicación en suelo con el fin de disminuir frecuencia y cantidad de irrigación (Terracottem), no se han reportado suficientes y consistentes datos. Los hidrogeles se emplean adicionalmente en campos deportivos y jardines (Terracottem) para disminuir los costos de mantenimiento y conservar la frondosidad.

En este trabajo se demuestra el efecto de incorporar hidrogeles de diferentes características en un suelo tipo franco arcilloso, con respecto a un suelo testigo (suelo sin hidrogel franco arcilloso). Para ello se define el comportamiento de liberación del suelo, con la elaboración de las curvas de retención de humedad, se evalúa la retención ante irrigación prolongada e instantánea y se realizan cultivos de acacia y rábano para determinar las diferencias en marchitez y crecimiento, con la determinación simultánea del contenido de humedad de los suelos en los cuales se hacen los cultivos.

Experimentación

Materiales

Tres de los hidrogeles que se emplean en este trabajo (H.1, H.2, H.3) se sintetizaron empleando la técnica de polimerización en suspensión inversa (PSI) y hacen parte de un estudio previo de producción y caracterización de hidrogeles (Omidian, 1998); comparativamente, se emplea una muestra comercial H.4. En la Tabla 1 se presentan las diferencias en la formulación de los hidrogeles, en la Figura 1.a se exhibe una microfotografía representativa de la morfología de los hidrogeles H.1, H.2 y H.3, y en la Figura 1b, del hidrogel H.4.

Tabla 1. Variables de formulación de los hidrogeles

Hidrogel	[E]*	[I]**	[C]***
H.1	02	08	52
H.2	02	08	32
H.3	05	11	42

E*: Concentración de entrecruzante [% mol monómeros]

I**: Concentración de iniciador [g/L] sln acuosa

C***: Concentración de monómeros [M] sln acuosa

Nota: Los tres hidrogeles tienen la misma relación molar de acrilamida a acrilato de potasio 6:4 y las mismas condiciones de proceso (Barón y Barrera, 2004)

Caracterización de los hidrogeles

Tanto los hidrogeles preparados como el comercial se caracterizan midiendo la capacidad y velocidad de hinchamiento, módulo elástico y capacidad de liberación.

Mediciones de hinchamiento libre. Capacidad y velocidad de hinchamiento

Para esta determinación se emplea un método gravimétrico, se pesa 0.1 g de hidrogel seco sobre un tamiz de malla 400 y se sumerge en agua potable ($K_h = 190,6\mu s$) durante lapsos de 1, 2, 3, 5, 15, 30, 60, 90 y 120 minutos, después de cada uno se drena el agua y se pesa el material hinchado. Cuando no hay diferencia significativa entre dos mediciones consecutivas, se logra la capacidad máxima de hinchamiento o de hinchamiento de equilibrio. Cada medición se realiza por triplicado.

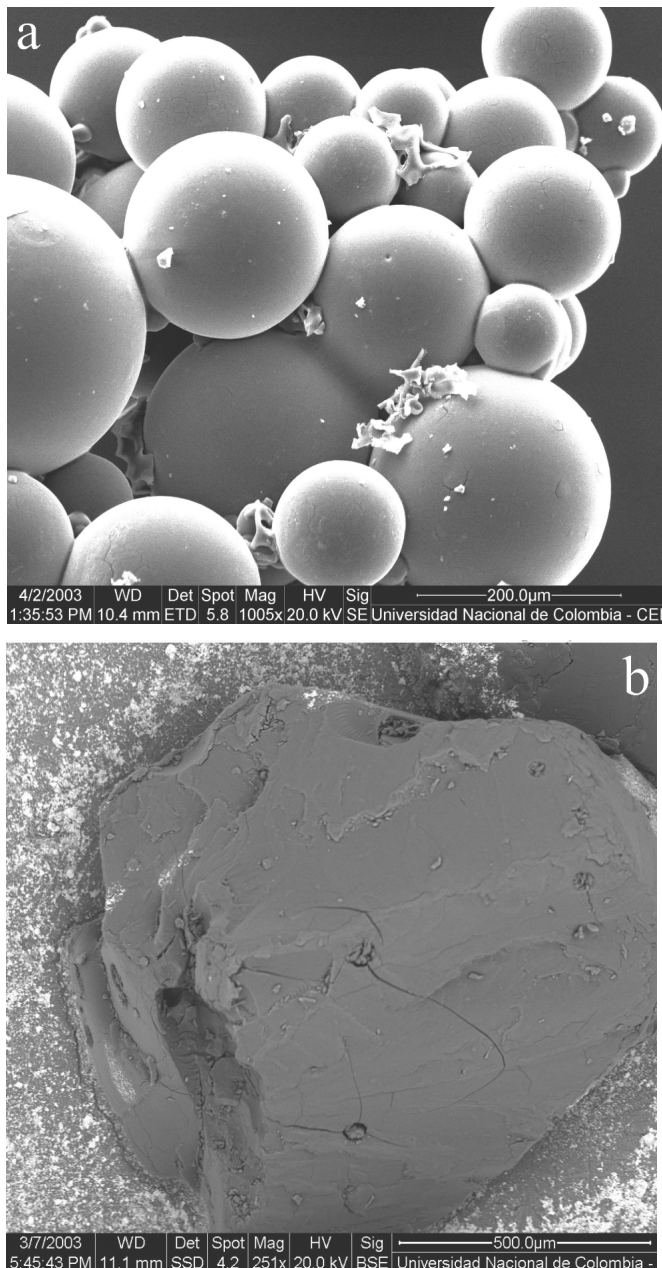


Figura 1. Microscopía SEM hidrogel empleados. (a) H.1 Mag. 1005x. Escala 200.0 μ m (b) H.4 . Mag. 251x. Escala 500.0 μ m.

La capacidad de hinchamiento q_t se calcula a partir de la masa de polímero al tiempo t (m_t) y la masa de polímero seco inicial (m_0), de la siguiente manera:

$$q_t = \frac{m_t - m_0}{m_0}$$

Con cada curva de hinchamiento obtenida, se efectúa la regresión de los datos de acuerdo con el siguiente modelo (Buchholz y Graham, 1998; Barón y Barrera, 2004).

$$\frac{dq}{dt} = k(q_\infty - q)$$

Donde q y q_∞ son la capacidad de hinchamiento en el tiempo t y en el punto de equilibrio respectivamente, k es la constante específica de velocidad que permite comparar directamente la velocidad de hinchamiento de los diferentes hidrogel (Buchholz y Graham, 1998; Barón y Barrera, 2004).

Medición del módulo elástico

Esta medición se hace de manera indirecta, a partir del balance de fuerzas sobre el agua presente en el hidrogel, esto es:

$$P = \Pi_{p_e} - G_{p_e}$$

Donde P es la presión externa, Π_{p_e} y G_{p_e} son la presión de hinchamiento y módulo elástico cuando actúa una presión P en el punto de equilibrio. Considerando la dependencia entre estas propiedades y la capacidad de hinchamiento, se obtiene la siguiente expresión (Buchholz y Graham, 1998; Barón y Barrera, 2004):

$$\left(\frac{q_{e_\infty}}{q_{p_e}}\right)^{\frac{9}{4}} - \left(\frac{q_{e_\infty}}{q_{p_e}}\right)^{\gamma} = \frac{P}{G_{e_e}}$$

Donde q_{e_e} , q_{p_e} y G_{e_e} , son la capacidad de hinchamiento en el equilibrio en ausencia de presión manométrica aplicada, la capacidad de hinchamiento en el equilibrio tras la aplicación de una presión P y el módulo elástico del hidrogel en el estado de hinchamiento del equilibrio en ausencia de presión P , respectivamente. En este trabajo se valida la anterior expresión con medición de q_{p_e} para diferentes presiones aplicadas empleando un sistema donde el polímero se pone en contacto con agua libre a través de una malla rígida mientras se aplica carga mecánica por medio de un pistón. La regresión lineal del término de la izquierda para un valor de γ de 1/3, no sólo confirma la veracidad de la teoría de la fibra elástica (Buchholz y Graham, 1998), sino que además permite obtener el valor del módulo elástico en el estado de equilibrio.

Medición de la razón de liberación

La razón de liberación se define como la relación entre el agua liberada y la masa de polímero seco presente; ante la aplicación de una presión dada y su funcionalidad con respecto a la presión permite establecer la facilidad de liberación entre los diferentes hidrogel. Para la medición de esta razón se seleccionan valores pF^{5*} de 2.7, 3, 3.4 y 3.7 que corresponden a presiones de 50, 100, 300, 500 KPa; de manera que se puede establecer la curva de liberación del agua que es aprovechable por las plantas. La aplicación de estas elevadas presiones es posible mediante el uso de ollas de presión de plato cerámico. Las especificaciones básicas del equipo son las siguientes:

^{5*} pF Potencial termodinámico del agua, las plantas aprovechan agua con pF entre 2 y 4.2.

- Marca Soilmoisture Equipment Corp
- Platos cerámicos CAT. 1600 y CAT 1500 para aplicación de baja y alta presión respectivamente
- Sistema de suministro de gas CAT 750-23 y válvulas de regulación.

El equipo consiste de un plato cerámico poroso, la cara inferior está sellada con un delgado diafragma de neopreno, generando un conducto para drenar el agua que atraviesa el plato. La muestra de hidrogel se coloca sobre la superficie del plato, el conjunto se lleva a saturación y se monta en la olla, con gas se aplica presión sobre la muestra; cuando la presión supera la atmosférica, el agua presente en la muestra se ve forzada a atravesar los poros del plato.

Se supone un modelo de comportamiento para la capacidad de liberación similar al presentado para el hinchamiento, solo que en este caso la variable independiente es la presión P:

$$\frac{dh}{dP} = k_p (h_\infty - h)$$

h es la capacidad de liberación para la presión establecida y se define como la razón entre el agua liberada y la masa de polímero seco presente, h_∞ corresponde a la capacidad de liberación en el equilibrio y k_p es la constante específica de liberación. En la Figura 2 se presenta una fotografía del montaje realizado para los ensayos



Figura 2. Montaje para la medición de las propiedades de liberación

Evaluación del desempeño en suelo de los hidrogeles

Como aditivo del suelo, el hidrogel debe ser el 0,1% peso, ya que concentraciones más bajas no representan cambios notables y proporciones superiores generan demasiada suavidad y esponjosidad en el suelo (Chatzopculos *et al.*, 2000).

Curvas de retención de humedad

La aplicación de presión incrementa el potencial químico del agua dentro de la estructura del hidrogel y por tanto del suelo acondicionado y genera la fuerza impulsora necesaria para liberar agua hacia los alrededores. Para la aplicación agroforestal el agua se clasifica de acuerdo con

su potencial termodinámico (pF), que se define como el logaritmo base 10 de la presión (expresada en cm H₂O) necesaria para liberar el agua. Las raíces de las plantas pueden absorber agua capilar, es decir, aquella con pF entre 2 y 4,2; por debajo de 2, el agua se denomina agua gravitacional, la cual no es aprovechable por la planta, dado el poco tiempo de contacto, y por encima de 4.2 el agua no puede ser succionada y las plantas presentes en el suelo con ese potencial termodinámico de agua se consideran en su punto de marchitez permanente (Barón y Barrera, 2004). Las gráficas de agua retenida con respecto a la presión o pF se conocen como curvas de retención de humedad y son características de cada suelo.

Ensayos de irrigación prolongada

En este ensayo se establece la capacidad de almacenamiento del suelo acondicionado ante ciclos de irrigación prolongada con el fin de alcanzar el punto de saturación de los hidrogeles presentes en el suelo; se emplea el protocolo que establecen Chatzopoulos *et al.* (2000). Se aplica un régimen de 30 mm h⁻¹, a una muestra de suelo acondicionada, durante 2 horas y ciclos alternantes sequía-lluvia de 1 hora a lo largo de 8 horas. Posteriormente, se permite el drenaje durante las 14 horas siguientes.

El equipo que se emplea consta de reservorio de agua graduado, difusor peristáltico, rebosadero, soporte del suelo y malla de retención. La fotografía se presenta en la Figura 3.

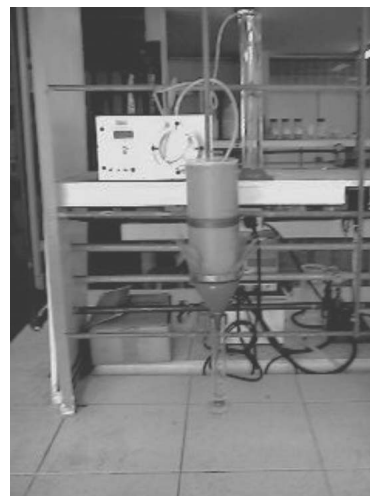


Figura 3. Montaje para la medición de la retención ante irrigación prolongada

Ensayos de irrigación instantánea

Con este ensayo se busca establecer la rapidez de reacción del sistema suelo-hidrogel para retener agua ante condiciones de irrigación instantánea.

La irrigación se hace sobre muestras de suelo en tubos de PVC de 2 pulgadas de diámetro, soportados por una malla rígida que retiene la mezcla y permite el drenaje de agua. El equipo consta de las siguientes partes:

- Bomba centrífuga $\frac{3}{4}$ HP
- Tubería succión diámetro 1.5 in, descarga 1 in
- Válvulas solenoides, globo y compuerta
- Manómetros
- Goteros calibrados 0.5 GPH

La irrigación es de 45 mL/min (equivalente a 89mm/min sobre un área de 5.1cm²), donde se aplican 180 mL durante 3 min de bomba encendida y 1min de inercia después de apagar la bomba (lapso durante el cual el agua remanente en la línea llega a la muestra de suelo). Luego, se toma el dato en peso del conjunto cuando el goteo se detiene en la parte inferior del recipiente, proceso que toma dos minutos adicionales. El montaje se presenta en la Figura 4.



Figura 4. Montaje para la medición de la retención ante irrigación instantánea

Ensayos de marchitez (siembra de acacias)

Se determina la marchitez de una población de 45 plántulas de acacia en fase vivero por formulación de hidrogel, por triplicado en tres grupos de 15 plántulas. Se permite un periodo de estabilización de dos semanas, durante el cual se aplica el mismo régimen de irrigación para todas las muestras. Posteriormente la irrigación se interrumpe y se hace el seguimiento del contenido de humedad del suelo empleando el equipo Moisture Meter tipo HH2 AT Delta-T Devices Ltda y se determinó la cantidad de plantas marchitas y el tiempo de aparición de los signos de marchitez durante 9 semanas. La marchitez se estableció con la aparición de la primera hoja marchita.

Ensayos de crecimiento (siembra de rábanos)

La utilidad del hidrogel en el crecimiento vegetal se estudia con la germinación de semillas de rábano *Crimson giant Reg. ICA 2553/99* en poncheras de suelo acondicionado con los diferentes hidrogeles en proporción del 0,1% en peso y para el suelo sin hidrogel (testigo), en poblaciones entre 40 y 50 semillas por triplicado, la irrigación se aplica en forma idéntica a todas las muestras a lo largo del ensayo y se hace seguimiento del contenido de humedad de la misma manera que en el ensayo de marchitez.

Resultados y discusión

Caracterización

En la Tabla 2 se presenta el resumen de las propiedades básicas de aplicación logradas para los diferentes hidrogeles evaluados en este trabajo. El resultado de cada propiedad es el promedio de la medición realizada por triplicado. El análisis completo de los métodos se despliega en otro lugar (Barón y Barrera, 2004).

Tabla 2. Propiedades básicas de aplicación hidrogeles sintetizados*

Hidrogel	Q_{∞} [g/g]	k [min ⁻¹]	G_{∞} [KPa]	k_p [KPa ⁻¹]
H.1	248	0.3076	0.3412	0.03248
H.2	226	0.2571	0.4498	0.02732
H.3	81	0.8715	5.7681	0.01366
H.4**	254	0.0394	0.3622	0.02519

*Todas las mediciones se realizan empleando agua potable
Kh = 190.6 μ S

**Este hidrogel es un producto comercial sintetizado por el proceso en solución.

Se observa que la capacidad máxima de hinchamiento, módulo y constante específica de liberación de H.1, H.2 y H.4 son bastante similares, el H.4 resulta ser más lento que los demás, lo que es debido a su baja área superficial y forma de partícula (Barón y Barrera, 2004; Sayil y Okay, 2001), como se indicó en la Figura 1. De otro lado, el hidrogel H.3 presenta comportamientos bastante contrastantes, como baja capacidad de hinchamiento y constante específica de liberación, pero velocidad de hinchamiento y módulo elástico bastante altos con respecto a los demás hidrogeles.

Curvas de retención de humedad

En la Figura 5 se presentan las curvas de retención de humedad logradas con las muestras de suelo-hidrogel trabajadas

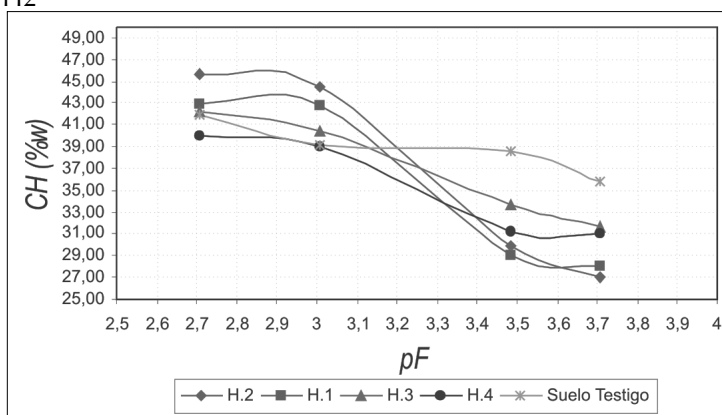


Figura 5. Curvas de retención de humedad: suelo acondicionado con hidrogel y sin él

El descenso de contenido de humedad (%CH) o del agua retenida por el suelo con respecto a la presión es carac-

terístico de este tipo de curvas; se observan los siguientes comportamientos:

- Para valores pF por debajo de 3.2 (equivalente a presiones inferiores a 1.55 bar), el contenido de humedad es mayor para los suelos acondicionados con los hidrogeles H.1 (42,92%), H.2 (45,61%) y H.3 (4,16%), con respecto a H.4 (40,04%) y el suelo testigo (41,98%), esto significa que los suelos acondicionados con H.1, H.2 y H.3 liberan menos cantidad de agua gravitacional ($pF < 2$) y retienen mayor cantidad de agua aprovechable para las plantas.
- Entre los valores pF 3 y 3.5 (equivalente a presiones ejercidas entre 1 y 3 bar), la pendiente de las curvas de descenso es mayor para los suelos acondicionados con los hidrogeles H.1 y H.2, que la de los hidrogeles H.3 y H.4, y casi nula para el testigo. Plantas con este pF de trabajo (la gran mayoría) obtienen mayor cantidad de agua de los suelos acondicionados con H.1 y H.2, con respecto al H.3 y H.4, y mucho más con respecto al testigo, ejerciendo la misma presión sobre el suelo.
- Para valores pF superiores a 3.5 (presiones superiores a 3bar), el menor contenido de humedad del suelo y por tanto mayor cantidad de agua liberada, lo presentan los suelos acondicionados con H.1 y H.2 (CH 27,98% y 27,10% respectivamente), en tanto que con H.4 y H.3 los valores son mayores (CH 31,03% y 31,67% respectivamente), el mayor valor lo presenta el suelo testigo, 35,83%, y por tanto la menor liberación de agua a alta presión. El anterior resultado indica que para los suelos acondicionados con los hidrogeles la mayor cantidad de agua se libera en la zona de trabajo de menor presión ejercida sobre el suelo por la mayoría de las plantas y por tanto, las que se encuentren en esos suelos acondicionados con hidrogel obtienen mayor cantidad de agua con menor esfuerzo. Este alivio energético para las raíces de las plantas en la obtención de agua se traduce en mayor posibilidad de crecimiento, formación de frutos y desarrollo metabólico de la planta. Adicionalmente, considerando toda la extensión de la curva se puede afirmar que el acondicionamiento del suelo con hidrogel incrementa la cantidad de agua liberada.
- Los hidrogeles H.3 y H.4 tienen comportamiento similar, aunque sean diferentes en su estado libre. Por la menor pendiente de las curvas de estos suelos se puede inferir una liberación más controlada que con los suelos acondicionados con H.1 y H.2; sin embargo, estos últimos liberan mayor cantidad de agua en el intervalo pF de trabajo de las plantas.

Resultados ensayos de irrigación prolongada

En la Figura 6 se presenta la curva obtenida para el suelo acondicionado con hidrogel H.1 comparado al testigo (sin hidrogel). En la ordenada, el término fracción corresponde a la relación entre la cantidad de agua suministrada o la retenida sobre el total adicionado.

Al apreciar la curva de fracción retenida del suelo acondicionado con H.1 con respecto a la del testigo, se observa que aquella siempre es superior y se mantiene en un valor constante, lo que quiere decir que el agua se retiene efectivamente; el valor constante al que se mantiene la curva queda definido en la primera aplicación de dos horas.

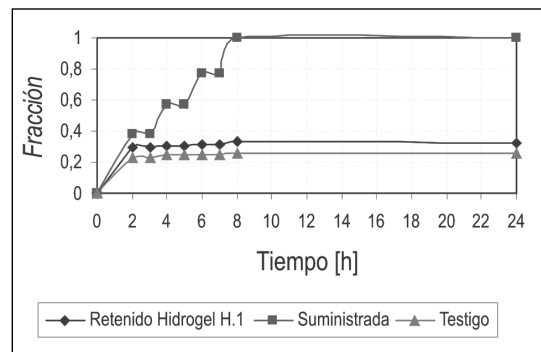


Figura 6. Resultado ensayos de irrigación prolongada.

En la Figura 7 se despliega una gráfica comparativa de la cantidad de agua retenida después de las dos primeras horas del ensayo.

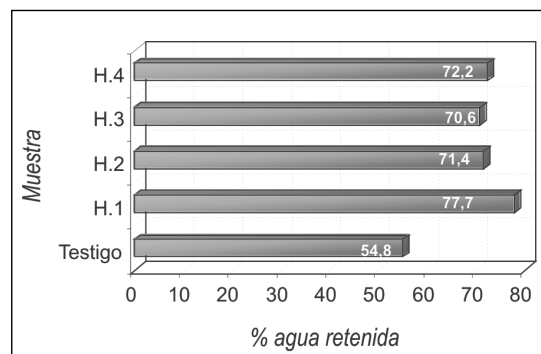


Figura 7. Resultado comparativo en retención tras las dos primeras horas de aplicación

De la anterior gráfica se puede observar que el incremento en retención ante condiciones de irrigación prolongada, con respecto al testigo, llega a ser hasta del 42%, como en el caso del acondicionamiento con H.1, lo cual es un incremento bastante significativo si se evalúa el aprovechamiento del sistema de riego instalado o del agua lluvia. Adicionalmente puede observarse que si la cantidad de agua adicional se atribuye exclusivamente a la acción del hidrogel, se puede hallar la capacidad de hinchamiento efectiva que este alcanzó después de las dos horas. Estas capacidades son 77, 75, 71 y 79 para los hidrogeles H.1, H.2, H.3 y H.4 respectivamente; como se observa, las capacidades de hinchamiento efectivas son similares independientemente de sus valores en hinchamiento libre.

El análisis de los resultados obtenidos tiene en cuenta que en las condiciones del ensayo los hidrogeles están sometidos a la presión que ejerce el suelo y adicionalmente a la presencia de diversidad de componentes químicos que limitan su capacidad de hinchamiento. Es preciso conocer la capacidad de hinchamiento de los hidrogeles en función

del tiempo y la presión para simular el comportamiento y comparar con lo obtenido experimentalmente. Buchholz plantea el siguiente modelo de hinchamiento en función de la presión y el tiempo (Buchholz y Graham, 1998):

$$q(t, P) = \frac{q_{e_{\infty}} (1 - e^{-kt})}{\left(1 + \left(\frac{P}{G_{\infty e}}\right)\right)^{0.44}}$$

A partir del anterior modelo y con las propiedades de capacidad máxima de hinchamiento, constante específica de velocidad y módulo elástico, se pueden generar las curvas de nivel para t=120 min (2h); en la Figura 8 se presentan las curvas de nivel obtenidas, en función de la presión.

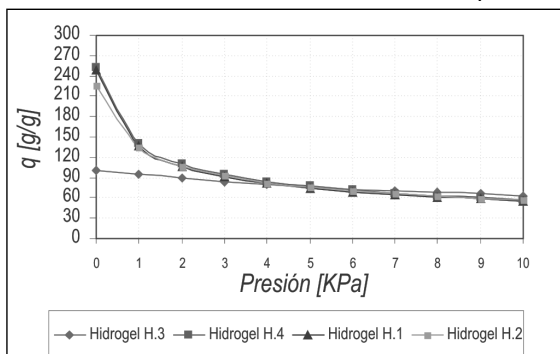


Figura 8. Curvas de nivel, modelo de simulación para t=120min

De la Figura 8 se desprende que si bien las capacidades de hinchamiento en el estado libre (ausencia de presión) son bastante diferentes, al aplicar la presión de 4Kpa (lo cual es normal para un suelo (Barón y Barrera, 2004)), la capacidad de hinchamiento de los cuatro hidrogel es prácticamente la misma. En la Figura 9 se exhibe la gráfica comparativa entre la diferencia de la capacidad de hinchamiento simulada a partir de las propiedades básicas de aplicación y la capacidad de hinchamiento observada experimentalmente.

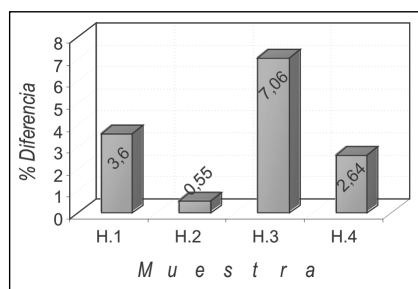


Figura 9. Comparativo capacidad de hinchamiento en suelo, entre el modelo de simulación y los datos experimentales

Se observa que las desviaciones entre el modelo propuesto y los datos experimentales no superan el 7%, siendo es un resultado muy satisfactorio para la predicción de la retención efectiva del hidrogel en condiciones de equilibrio (2 horas de aplicación) conocidas sus propiedades básicas de aplicación.

Resultados de los ensayos de irrigación instantánea

En la Figura 10 se compara la retención de las diferentes muestras después de 6 minutos de aplicación.

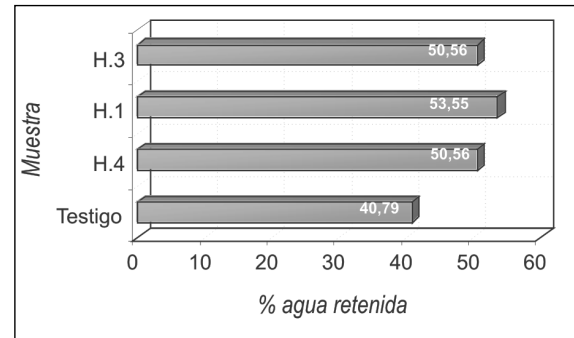


Figura 10. Resultado comparativo en retención tras los seis primeros minutos de aplicación

En este caso, la diferencia en retención con respecto al testigo llega a ser hasta del 31%, como en el caso del hidrogel H.1, evaluando las curvas de nivel para el tiempo de seis minutos y determinando la diferencia entre el modelo de simulación y las observaciones experimentales, la desviación es menor al 20% para los hidrogel H.1 y H.3 y casi del 50% para el H.4; el resultado se atribuye a la mayor variabilidad en la constante específica de velocidad de hinchamiento que presenta el hidrogel H.4, dado su bajo contenido de archilamida (Barón y Barrera, 2004).

Al realizar una segunda aplicación se observa que el hidrogel H.3 no absorbe más agua, dada su rápida saturación, en tanto que los H.1 y H.4 sí lo pueden hacer, pero para incrementar el hinchamiento de estos últimos es necesaria la pérdida de mayor cantidad de agua por drenaje, indicando en este caso la ventaja de H.3, por su rápida saturación.

Resultado de las pruebas de marchitamiento

El montaje del ensayo se aprecia en la Figura 11.



Figura 11. Montaje ensayo de marchites

En la Figura 12 se presenta la relación entre el contenido de humedad (CH%) y el tiempo para los diferentes montajes. Se observa un descenso monótono de las curvas, donde la curva del suelo acondicionado con hidrogel H.1 es superior

a las demás curvas durante todo el período de seguimiento, lo que indica mayor contenido de humedad en el suelo. A medida que pasa el tiempo, las curvas se acercan a la curva del testigo.

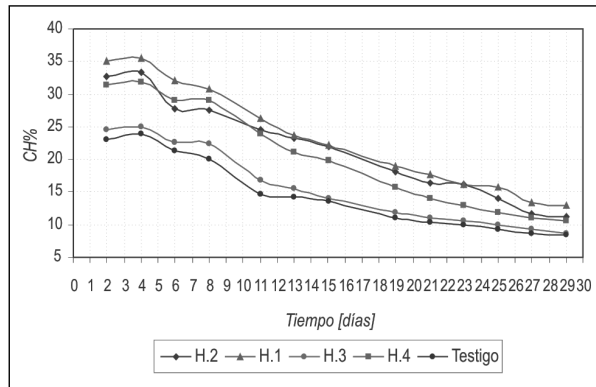


Figura 12. Seguimiento contenido de humedad durante el ensayo de marchitez

El descenso de humedad de las curvas se atribuye a la tasa de evaporación y el posible flujo gravitacional, en tanto que la disminución en la diferencia entre las curvas es la cantidad de agua que toman las plantas para sobrevivir a la sequía (transpiración) (Barón y Barrera, 2004). El comportamiento de marchites con respecto al tiempo complementa las observaciones anteriores, pues las plantas en suelos acondicionados no mueren a pesar del descenso de humedad. En la Figura 13 se presenta el comportamiento de marchitez.

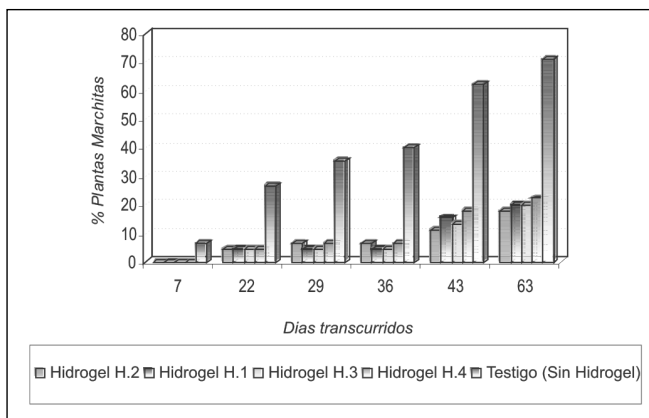


Figura 13. Comportamiento de marchitez con respecto al tiempo

En la anterior Figura se observa la tendencia creciente de todas las curvas, pero es más pronunciada la del testigo. En el testigo, al transcurrir la primera semana de sequía el 7% de la población se marchitó, mientras que en los suelos acondicionados ninguna de las plantas presentó indicios de marchitamiento. El nivel del 7% lo alcanzan las muestras acondicionadas 25 días después de la sequía, en este punto, en el testigo se marchitó el 30% de la población. Al final del ensayo (63 días) la diferencia es considerable; en el testigo murió el 70% de la población, mientras que en los suelos acondicionados con hidrogel la población muerta no supera el 25%.

En la Figura 13 no se observa diferencia apreciable entre las muestras de hidrogel; sin embargo, se identifica mayor frondosidad para las plantas cultivadas en los suelos acondicionados con los hidrogeles H.1, H.2 y H.4. Para la comprensión de este comportamiento, en la Figura 14 se registra la diferencia de humedad de los suelos acondicionados con los diferentes hidrogeles con respecto al testigo al empezar el sometimiento de las plantas a la marchitez.

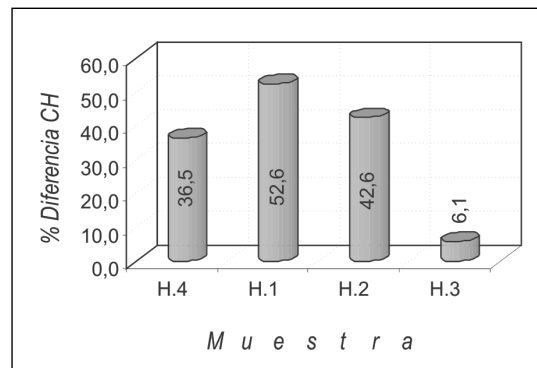


Figura 14. Diferencia en contenido de humedad. Principio de ensayo de marchitez

Se ve que para el mismo régimen de irrigación establecido hasta antes de la sequía, los suelos acondicionados con los hidrogeles H.1, H.2 y H.4 presentan mayor contenido de humedad en relación al testigo en un 52,6, 42,6 y 36,5%, respectivamente. El contenido de humedad en el suelo acondicionado con el hidrogel H.3 es superior en sólo un 6,1%; a pesar de la pequeña diferencia en la humedad de este suelo con respecto al testigo, las plantas no murieron con la misma velocidad que en el suelo testigo, por lo que se infiere un proceso de liberación controlada de agua por parte de este hidrogel. Finalmente, con los valores de contenido de humedad al inicio del periodo de sequía se establece una disminución en la cantidad de agua que se emplea en la irrigación, con respecto a la que se emplearía en un suelo testigo en las mismas condiciones, del 34,5, 29,9, 5,7 y 26,8% para los hidrogeles H.1, H.2, H.3 y H.4, respectivamente. A partir de lo anterior se puede inferir la ventaja económica del uso de los hidrogeles debido a los menores consumos de agua y frecuencias de irrigación necesarias.

Resultados de los ensayos de crecimiento

Manteniendo el mismo régimen de irrigación durante el tiempo, se logran los contenidos de humedad que se presentan en la Figura 15.

De la figura anterior, se deduce que los contenidos de humedad se mantienen alrededor de un valor medio para los diferentes suelos acondicionados. En la Figura 16 se presenta la diferencia entre ese contenido de humedad mantenido para cada suelo, con respecto al testigo

En la Figura 16 se aprecia una diferencia en contenido de humedad hasta del 87,5, 69,2, 55,5 y 9,4% para H.1, H.2, H.4 y H.3, respectivamente, por lo que se infiere

una reducción bastante alta en el agua requerida para irrigación, esto es: 46,7, 40,9, 35,7 y 8,6% para la misma secuencia de hidrogeles. Simultáneamente, se hizo el seguimiento del crecimiento de biomasa de las especies; en la Figura 17 se señala la diferencia de crecimiento con respecto al testigo.

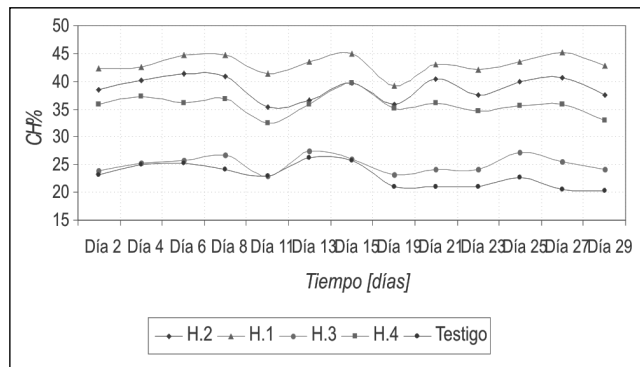


Figura 15. Seguimiento contenido de humedad durante el ensayo de marchites

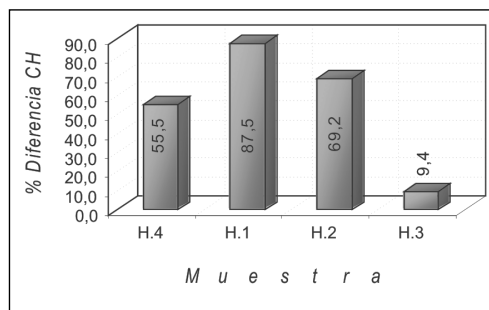


Figura 16. Diferencia en contenido de humedad con respecto al testigo a lo largo del ensayo de crecimiento

Es importante resaltar que el crecimiento en H.1 y H.2 se vio afectado por el valor tan alto de humedad logrado, por lo que no sólo es conveniente descender la irrigación por razones económicas sino de salubridad de la especie, adicionalmente, a pesar del poco aumento en humedad logrado por H.3 las especies logran notable crecimiento, lo cual es coherente con las observaciones previas de liberación más amortiguada que se obtienen con este hidrogel. En todos los suelos acondicionados con hidrogel se observa mayor crecimiento que en el suelo testigo.

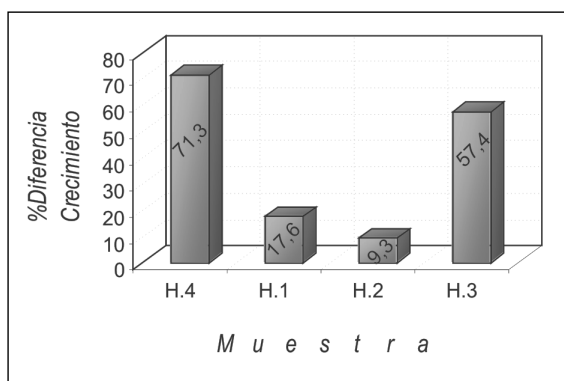


Figura 17. Diferencia en crecimiento en biomasa de los rábanos

Conclusiones

Definitivamente se establece la opción de los hidrogeles como alternativa válida para la conservación de recursos hídricos y de suelo, se disminuye el consumo de agua, los suelos mejoran sus propiedades de liberación y retención y se logra mayor producción y resistencia de las especies en condiciones hostiles.

La alteración de la curva de retención de humedad por parte de los hidrogeles es benéfica desde todo punto de vista, ya que en el intervalo de trabajo de las plantas, los suelos liberan mayor cantidad de agua significando alivio energético para las plantas, por lo que estas pueden emplear esa energía en funciones de crecimiento o formación de frutos, entre otras actividades; adicionalmente, se libera menos cantidad de agua gravitacional (no aprovechable), aumentando la cantidad de agua útil en el suelo.

La retención de agua en los suelos incrementa dependiendo de las características de los hidrogeles, como se presentó en el artículo, aunque resulta ser bastante similar dada la combinación de propiedades de los mismos; con respecto a lo anterior, es válida la predicción de Buchholz para hidrogeles de aplicación sanitaria, una vez son conocidas las propiedades como módulo elástico, capacidad de hinchamiento en el estado libre y constante específica de velocidad de hinchamiento para cada hidrogel. La predicción es más apropiada en condiciones de equilibrio de hinchamiento y donde el alto contenido de acrilamida de la cadena polimérica permite omitir los efectos de carga iónica en el modelo.

En condiciones donde es importante la velocidad de retención de agua, por ejemplo cuando se hacen necesarias irrigaciones instantáneas dado el poco tiempo de acceso a fuentes de agua, son convenientes los hidrogeles de alta velocidad de hinchamiento como el H.3 de este trabajo.

La mayor retención de agua en el suelo por el acondicionamiento con hidrogeles permite sobrevivir a las especies forestales cultivadas ante condiciones de sequía. El primer indicio de marchitamiento se retrasa hasta en un 400% para especies forestales y para sequías prolongadas la cantidad de plantas marchitas desciende en un 250%.

Para la misma cantidad de irrigación y frecuencia, al darse las condiciones de sequía las acacias cultivadas en suelos con hidrogel continúan su crecimiento y desarrollo por más tiempo que las cultivadas en suelo sin acondicionar.

Se infiere una disminución en la cantidad de agua que se emplea en la irrigación del 34,5, 29,9, 5,7 y 26,8% para los hidrogeles H.1, H.2, H.3 y H.4, respectivamente, en el caso de las acacias, el resultado es mucho más alto para los rábanos, siendo, en el mismo orden, de 46,7, 40,9, 8,6 y 35,7%; con los anteriores datos se puede evaluar el impacto económico del empleo de los hidrogeles, mejorando la competitividad del sector agroforestal, dada la complemen-

tiedad entre conservación de recursos y disminución de costos de mantenimiento e irrigación.

La aparente desventaja del hidrogel H.3 dada su baja capacidad de hinchamiento en el estado libre se ve compensada por su alto módulo y velocidad de hinchamiento; adicionalmente, sus características estructurales dan una baja razón de liberación que logran características de liberación controlada en el cultivo. Los hidrogeles H.1 y H.2 que presentan propiedades bastante similares a H.4 salvo su forma de partícula (recordar que H.1 y H.2 son obtenidos por polimerización en suspensión inversa y presentan una forma de partícula completamente esférica, en contraste a H.4, que es completamente irregular), dan mejores propiedades de liberación cuando están en combinación con el suelo y retienen mayores cantidades de agua ya sea ante condiciones de irrigación instantánea o prolongada y mantienen la humedad en un más alto valor en los cultivos, este resultado se constituye en uno de los primeros en resaltar la ventaja de la forma completamente regular de los hidrogeles en la aplicación agroforestal.

Agradecimientos

A la División de Investigación Sede Bogotá DIB, Proyecto 2020000, por su apoyo financiero. A los Ingenieros Carlos González y John González, del Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, amigos fundamentales en el desarrollo de este trabajo.

Bibliografía

- Barón, A., Barrera, X., Producción y Evaluación de un Hidrorretenedor para Aplicaciones en el Sector Agroforestal., Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, 2004.
- Barón, A., Superabsorbent hydrogel for agricultural applications., Synthesis and Evaluation., 7th World Congress of Chemical Engineering, 2005.
- Beltrán, J., Forero, F., Liberación de Teofilina desde Hidrogeles derivados del Ácido Itacónico., Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, 2001.
- Buchholz, F. L., Graham, A. T., Modern superabsorbent polymer technology, Wiley-VCH, 1998.
- Bueno, D., Chamorro, L., Liberación controlada de Teofilina y Ciprofloxacina desde Hidrogeles basados en el copolímero HEMA-co-MMA., Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- Chatzopoulos, F., Fugit, J. L., Ouillon, I., Rodriguez, F., Taverdet, J. L., Étude, en fonction de différents paramètres, de l'absorption et de la désorption d'eau par un copolymère acrylamide-acrylate de sodium réticulé., *European Polymer Journal*, 36, 2000, pp. 51-60.
- Ditta, E., Pinilla, A., Síntesis de un Hidrogel a partir de HEMA y Ácido Acrílico para la liberación controlada de un Fármaco., Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- Katime, I., Novoa, R., Daz de Apodaca, E., Mendizabal, E., Puig J., Theophylline release from poly(acrylic acid-co-acrylamide) hydrogels., *Polymer Testing*, 18, 1999, pp. 559-566.
- Kazanskii, K. S., Dubrovskii, S. A., Chemistry and Physics of "Agricultural" Hydrogels., *Advances in Polymer Science*, 104, 1992, pp. 97-133.
- Kiatkamjornwong, S., Phunchareon, P., Influence of Reaction Parameters on Water Absorption of Neutralized Poly(acrylic acid-co-acrylamide) Synthesized by Inverse Suspension Polymerization., *Journal of Apply Polymer Science*, Vol 72, 1999, pp. 1349-1366.
- Mohana Raju, K., Padmanabha Raju, M., Síntesis of novel superabsorbent copolymers for agricultural and horticultural applications., *Polymer International*, 50, 2001, pp. 946-951.
- Mohana Raju, K., Padmanabha Raju, M., Murali Mohan, Y., Synthesis of superabsorbent copolymers as water manageable materials., *Polymer International*, 52, 2003, pp. 768-772.
- Okay, O., Macroporous copolymer networks., *Progress in Polymer Science*, 25, 2000, pp. 711-779.
- Omidian, H., Hashemi, S. A., Sammes, P. G., Meldrum, I., A model for the swelling of superabsorbent polymers., *Polymer*, 26, 1998, pp. 6697-6704.
- Penagos, J., Quintero, D., Síntesis de un Hidrogel base acrílica para la liberación controlada de sustancias nutritivas agrícolas., Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, 1999.
- Sayil, C., Okay, O., Macroporous poly(N-isopropyl)acrylamide networks: formation conditions., *Polymer*, 42, 2001, pp. 7639-7652.
- TERRACOTTEM., Soluciones de futuro para repoblaciones forestales, Publicación empresarial.