

XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010

RECUPERACIÓN DE ACUÍFEROS EN DOS MICROCUENCAS
(PASTURAS-PLANTACIÓN DE EUCALYPTUS) DEL URUGUAY

Luis Silveira¹⁾, Alejandro Schipilov²⁾, Magdalena Crisci¹⁾, Jimena Alonso¹⁾, Leticia Martínez³⁾,
Santiago Symonds¹⁾, Christian Chreties¹⁾

¹⁾ Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República; ²⁾ Consultor; ³⁾ Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía, Universidad de la República
lesy@fing.edu.uy; alejandro.schipilov@gmail.com; mcrisci@fing.edu.uy; jalonso@fing.edu.uy;
lmartinez@fagro.edu.uy; ssymonds@fing.edu.uy; chreties@fing.edu.uy

RESUMEN:

La forestación industrial se desarrolló en el Uruguay entre 1989 a la fecha. La superficie plantada con *Eucalyptus* y *Pinus* se multiplicó por 20, alcanzando aproximadamente 1.000.000 de hectáreas. La sustitución de pasturas naturales por bosques artificiales provocó inquietud con relación a su impacto sobre los recursos hídricos y, en particular, sobre la disponibilidad de aguas subterráneas en perforaciones someras. Este trabajo presenta datos de la evolución de niveles piezométricos registrados entre Agosto de 2009 y Abril de 2010 en dos microcuencas experimentales con diferente cobertura (*Eucalyptus* y pasturas naturales). El período de monitoreo se caracteriza por anomalías hidrológicas: déficit hídrico en meses de invierno-primavera y lluvias en exceso en meses de verano. En estos últimos se observa una mayor recuperación de niveles (recarga) en la microcuenca forestal, seguida de un rápido descenso, mayor que en pasturas, entre evento y evento.

ABSTRACT:

The industrial afforestation in Uruguay was developed between 1989 until nowadays. The surface planted with *Eucalyptus* and *Pinus* was multiplied by 20, reaching approximately 1.000.000 hectares. The substitution of natural pastures for artificial forests produced worry with regard to his impact on the water resources and, especially, on the availability of groundwater in shallow wells. This paper shows data concerning the piezometric levels and its evolution with time, monitored between August 2009 and April 2010, in two experimental microbasins with different coverage (*Eucalyptus* and natural pastures). The monitoring period was characterized for hydrological anomalies: rainfall deficit in winter-spring months and rainfall in excess during summer months. In the rainy period, a major recovery of groundwater levels (recharge) is observed in the forest microbasin, followed by a rapid decrease, major that in pastures, between event and event.

PALABRAS CLAVES:

Recarga, niveles piezométricos, perforaciones someras

INTRODUCCIÓN

La forestación industrial se desarrolla en Uruguay a partir de fines de la década de los 80. El área plantada con *Eucalyptus* y *Pinus*, en sustitución de pasturas naturales, pasó de una superficie de 45.000 hectáreas en 1990, a aproximadamente 1.000.000 de hectáreas en diciembre de 2009.

Este cambio del uso de los suelos provocó inquietud en relación a la disponibilidad de los recursos hídricos. Particularmente en la zona litoral del país, la población que depende de perforaciones someras para el consumo de agua potable, abrevadero de animales y/o riego, es muy sensible. No es inusual que en la prensa se publiquen artículos sobre los perjuicios causados por los *Eucalyptus*, con titulares alarmistas. Algunos ejemplos: “El modelo forestal en el banquillo: ...Si usted está en Tacuarembó o Rivera y está rodeado de eucaliptos, tiene inmediatamente los problemas. Las que primero sufren son las pequeñas napas subterráneas que están a una profundidad de 3 a 10 metros. Son las que habitualmente se utilizan en los establecimientos rurales para darle agua al ganado, para los molinos y los pozos que abastecen el ganado y las casas, por ejemplo. Esas napas tienen poca capacidad de almacenamiento y están muy vinculadas con las lluvias. Entonces suenan inmediatamente cuando hay plantaciones de eucaliptos en su área de influencia, donde están sus recargas.” (Radio El Espectador, En Perspectiva, entrevista de Emiliano Coteló al Ing. Agr. Carlos Pérez Arrarte, 19.07.2006); “El movimiento de chacreros de Soriano denunció que el crecimiento de la forestación ha generado problemas en el abastecimiento de agua de la zona. Se refieren concretamente a la expansión de los eucaliptos, que absorben grandes cantidades de líquidos del suelo.” (Diario La República, 03.02.2007); “En Soriano, donde la forestación impactó gravemente sobre el agua, se pasó de 14 familias a las cuales se les llevaba agua en camiones cisterna en el año 2000 a un total de 200 familias en la actualidad.” (Grupo Guayubira, 27.01.2009).

Tampoco es inusual que se presenten denuncias a las autoridades municipales: “En Soriano, un grupo de chacreros que producen en las afueras de Mercedes evalúan por estos días la posibilidad de iniciar una demanda contra empresas forestales que plantaron eucaliptos en unas 7.000 hectáreas que los rodean. Desde hace un tiempo los pozos -cuya agua usan para regar, pero también para vivir- comenzaron a secarse. El proceso siguió, a pesar de que buscaron agua a mayor profundidad. Actualmente, la Intendencia de Soriano debe repartir agua "puerta a puerta", a unos 146 productores; todos los días deposita miles de litros en tanques que se encuentran en las porteras de los pequeños establecimientos. Apoyados por organizaciones ambientalistas, los productores creen - y ahora buscan confirmarlo con estudios técnicos- que los eucaliptos se están "chupando" toda el agua de la zona.” (Diario El País, 22.10.2006).

Asimismo, un grupo de docentes de la Facultad de Ciencias (Universidad de la República) produce un informe en que señala: “...los estudios demuestran que la forestación disminuye el rendimiento hidrológico... y el drenaje profundo, los cuales son responsables de la recarga de acuíferos y la alimentación de arroyos.” (Panario, D. et al., 2006). Y el Grupo Guayubira publica un libro de similar tenor (Pérez Arrarte, 2007). Ambas publicaciones son, básicamente, revisiones bibliográficas en que se utilizaron mayoritariamente estudios científicos de otras áreas del continente o del mundo, con distintos suelos, climas y ecología al Uruguay. En tanto, los estudios nacionales fueron citados parcialmente, extrayendo conclusiones fuera de contexto y, por lo tanto, erróneas.

En todos estos artículos de prensa, informes y libros, conteniendo denuncias sobre el impacto que causa la forestación sobre los recursos hídricos, no se hace mención alguna a que el período Abril de 2006 a Setiembre de 2009 se caracterizó por un déficit de precipitaciones, con excepción del

semestre Octubre 2006 a Marzo 2007. En efecto, la Tabla 1 muestra la precipitación semestral y anual registrada en el período citado, valores que pueden compararse con la precipitación media anual histórica en la región, del orden de 1200 a 1300 mm. Por consiguiente, cabe preguntarse ¿cuánto se deben los descensos de los niveles freáticos a la menor recarga por déficit hídrico y cuánto al consumo de los árboles?

Tabla 1.- Precipitación semestral y anual en las microcuencas

Período	Precipitación semestral (mm)	Precipitación anual (mm)
Abr 06 – Set 06	380	
Oct 06 – Mar 07	1.111	
Abr 07 – Set 07	451	1.562
Oct 07 – Mar 08	599	
Abr 08 – Set 08	337	936
Oct 08 – Mar 09	528	
Abr '9 – Set 09	274	802

Para dar respuesta a la necesidad de contar con información nacional que evalúe los efectos hidrológicos que causan los cambios de uso de la tierra, las Facultades de Agronomía e Ingeniería, de la Universidad de la República, establecieron un programa de investigación y monitoreo en cuencas hidrográficas y parcelas experimentales, que tiene por propósito obtener indicadores sobre los cambios del ciclo hidrológico, producto de esta modificación del uso de los suelos, que sustenten la toma de decisiones políticas, para propender a un Manejo Forestal Sustentable.

OBJETIVO

Este trabajo tiene por propósito, presentar resultados correspondientes a Agosto 2009 – Abril 2010, período en que se comenzó a monitorear - de forma continua – la respuesta del acuífero superior frente a eventos de lluvia y no lluvia, en dos microcuencas sometidas a distinto manejo (plantación forestal – pasturas naturales para uso ganadero).

MATERIALES Y MÉTODOS

a) Área de estudio

Las microcuencas experimentales se ubican en el departamento de Paysandú, en la zona litoral del Uruguay (Figura 1). La microcuenca forestal (*Eucalyptus globulus sp. Maidenni*, implantada en el otoño-primavera del año 1998, con una densidad de 895 árboles/há) está situada en el predio Don Tomás y la microcuenca cubierta por pasturas naturales está situada en el predio La Cantera. Sus cauces principales son la cañada de Baigorria y la cañada de la Quinta, respectivamente, ambos afluentes del arroyo Capilla Vieja en su margen izquierda.

b) Geología

La Figura 2 muestra los resultados del relevamiento geológico regional, escala 1:50.000, ubicando también las microcuencas en estudio. Las unidades cartografiadas no son formales sino unidades litológicas homogéneas que podrán comportarse de forma similar respecto del fin perseguido (el modelo conceptual hidrogeológico). Las unidades formales son: Aluviones, Fm. Mercedes y Fm. Guichón. Dentro de la formación Mercedes se han separado tres unidades litológicas no formales, que denominamos Mercedes areno-arcilloso, Mercedes conglomerádico y Mercedes calcáreo.

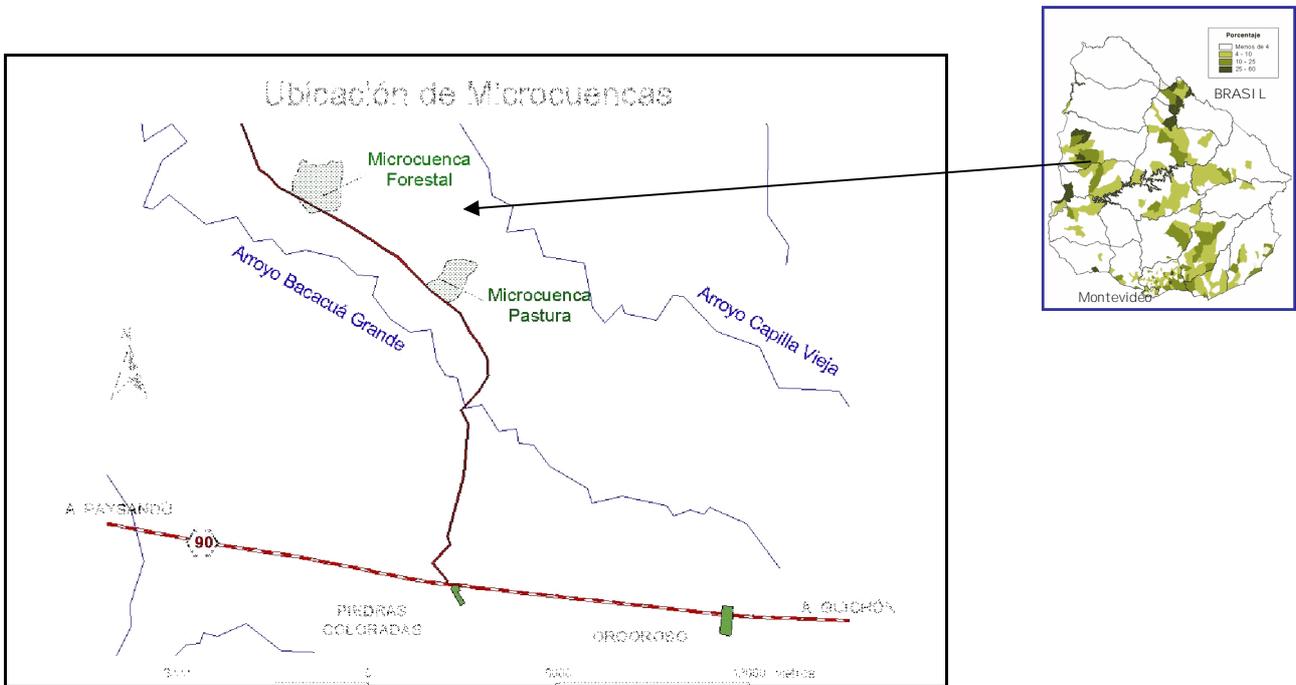


Figura 1.- Ubicación de las microcuencas experimentales

Fm. Guichón: Está representada por una arenisca fina a media, relativamente bien seleccionada, y con abundante contenido arcilloso que puede estimarse como superior al 15%. Son comunes fenómenos secundarios de silicificación.

Fm. Mercedes – areno arcillosa: Con este término se incluyen las areniscas finas a medias, a veces conglomerádicas, pero siempre con elevado contenido en materiales finos (pelitas s.s.). Esta unidad puede presentar grados variables de cementación con sílice, pero siendo siempre superior al contenido en carbonato de calcio como agente cementante.

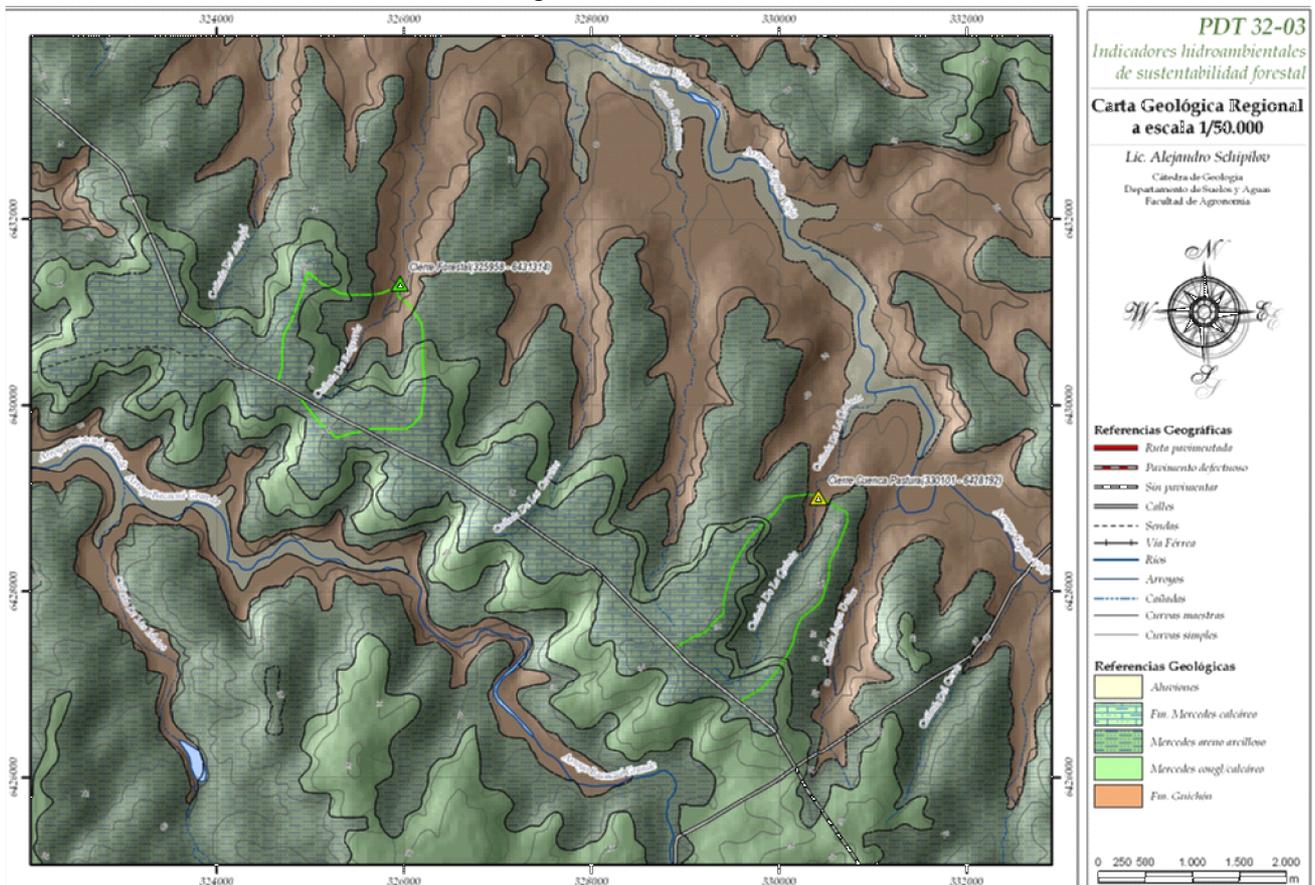


Figura 2.- Carta geológica regional (Schipilov, 2006)

Fm. Mercedes – conglomerádico: Se compone fundamentalmente de dos ciclos conglomerádicos granodecrecientes, que pasan muy rápidamente de conglomerados groseros a areniscas muy finas completamente cementadas con carbonato de calcio, constituyéndose en areniscas calcáreas o calizas arenosas de delgado porte.

Fm. Mercedes – calcáreo: Se trata de areniscas finas a medias con esporádicos granos de arena gruesa bien redondeada, cementadas con carbonato de calcio, pudiendo alcanzar este último el 70% en volumen de la roca, considerándose entonces como calizas arenosas. Este nivel es el responsable de la escarpa más continua y con mayor índice de afloramientos en toda la región. La estructura sedimentaria posee una disposición absolutamente horizontal. La permeabilidad del medio subterráneo es baja.

Aluviones: Esta unidad ocupa zonas topográficamente deprimidas, asociadas a los arroyos Bacacúa Grande y Capilla Vieja. Estos depósitos de arenas finas a medias, arcillosas, esporádicamente con niveles rudáceos, dan lugar a planicies anegables.

En la Figura 3 se expone un perfil esquemático de la secuencia sedimentaria que podría atravesarse en esta región.

A partir del relevamiento geológico, se formuló el modelo conceptual respecto al almacenamiento y circulación del agua subterránea:

- a) Se definen 6 niveles diferentes con distintas propiedades texturales que le conferirán disímiles cualidades hidrogeológicas. En orden estratigráfico (de base a techo) serían:
 - a. Areniscas arcillosas de la formación Guichón. Tienen alrededor de 15% de arcilla homogéneamente distribuida en la roca.
 - b. Areniscas deargilizadas de la Fm. Guichón. El contenido en arcilla es menor al 5% y el cemento carbonático no es significativo.
 - c. El conjunto de litologías agrupadas bajo el nombre “Fm. Mercedes areno-arcillosa” poseen características texturales y estructurales particulares: son lechos discontinuos, poco extensos en la vertical (hasta 2 metros como máximo) que comienzan en gravas arenosas y culminan en areniscas lutíticas.
 - d. Los dos estratos gravillosos extremadamente cementados con sílice de la Fm. Mercedes conglomerádico se comportarán como un medio impermeable, con porosidad adquirida por fracturación.
 - e. Los lechos calcáreos con más del 60% de carbonato de calcio de la Fm. Mercedes en su facies calcárea también se comportarán como un medio permeable por fracturación.
 - f. Entre los lechos calcáreos se disponen estratos arenosos con abundante matriz calcárea que se comportarán como un medio poroso de permeabilidad reducida.
- b) Los niveles de permeabilidad reducida – sea por su contenido en arcilla, sea por la intensidad de los procesos de cementación – se comportarán como pisos de acuíferos colgados. El drenaje se producirá por las áreas aflorantes o bien a través de fracturas o zonas más permeables en su base.
- c) Los niveles conglomerádicos fuertemente silicificados de la facies central de la formación Mercedes poseen una continuidad lateral regional.
- d) El nivel calcáreo superior de la Fm. Mercedes posee asimismo extensión regional.
- e) Ambos, la facies inferior de la Fm. Mercedes como el techo deargilizado de la Fm. Guichón, tienen extensión local.

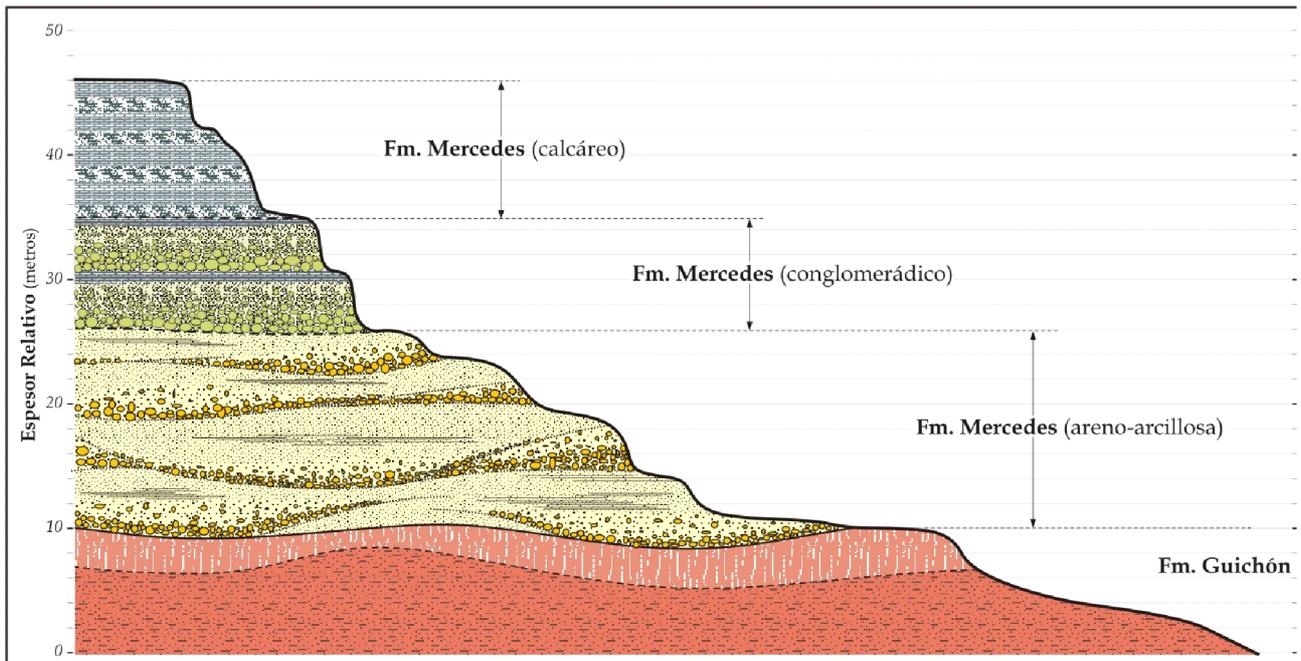


Figura 3.- Perfil esquemático de la secuencia sedimentaria

De lo expuesto, se identifica, al menos, cuatro pisos de permeabilidad reducida, que darían lugar a otro tanto de acuíferos colgados, según se ejemplifica en la Figura 4. Asimismo, se ubican las cinco posiciones donde se detectaron vertientes (manantiales) o zonas húmedas.

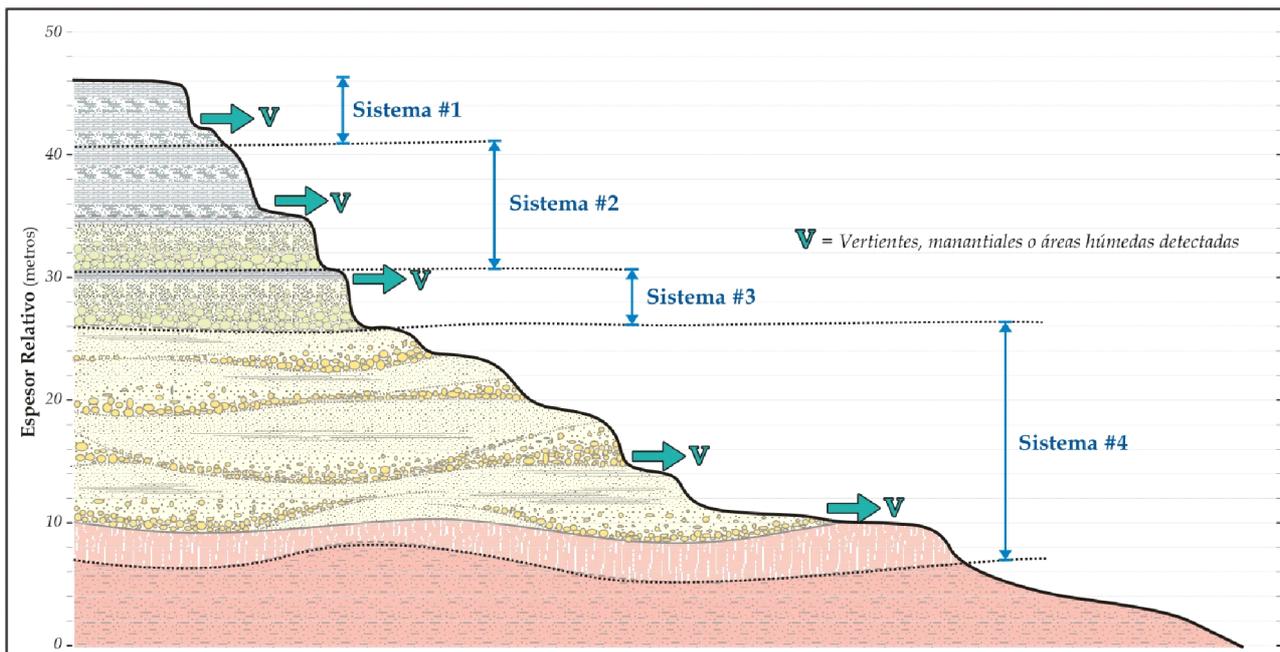


Figura 4.- Sistema de acuíferos colgados

c) Metodología del Programa de Monitoreo

Si bien la descripción geológica permite concluir la necesidad de construir grupos de 3 piezómetros, con diferentes profundidades, en 3 ubicaciones diferentes, los recursos financieros disponibles en el proyecto de investigación solo permitieron construir un piezómetro superficial en cada ubicación.

En la microcuenca Don Tomás (plantaciones forestales):

- Forestal alto: en cabecera Suroeste de la microcuenca a cotas 82-86m, se construyó una perforación de 4,70 metros de profundidad, que evalúa la freática instalada en las litologías calcáreas del nivel superior de la Fm. Mercedes.
- Forestal medio: prácticamente en el baricentro de la microcuenca, a cotas cercanas a los 65 metros, se construyó un piezómetro de 4,90 metros, que evalúa la freática en la facies media de la Fm. Mercedes, correspondiente a conglomerados silicificados.
- Forestal bajo: prácticamente en el cierre de la microcuenca, hacia el Suroeste del mismo, a cotas próximas a los 55m, se construyó un piezómetro de 4,80 metros de profundidad, que capta la freática instalada en las areniscas arcillosas y bancos gravillosos del tercio inferior de la Fm. Mercedes.

En la microcuenca La Cantera (pasturas naturales) la ubicación de los piezómetros es similar:

- Pastura alto: una perforación ubicada a cotas 85 a 90 metros en el extremo Suroeste de la microcuenca, de 4,76 metros, evaluando la freática en las litologías calcáreas, interceptando la Fm. Mercedes.
- Pastura medio: una perforación en el Noroeste de la microcuenca, a media ladera sobre la divisoria occidental a cotas próximas a los 75 metros, de 4,68 metros de profundidad, que evalúa el acuífero colgado instalado en la facies media de la Fm. Mercedes.
- Pastura bajo: un piezómetros a cota 55-60 metros, inmediatamente al Este del cierre de la microcuenca, de 3,41 metros de profundidad, que evalúa la freática emplazada en las areniscas arcillosas de la facies inferior de la Fm. Mercedes.

Los piezómetros, de 160 mm de diámetro, fueron construidos mediante rotoperCUSión neumática, en Noviembre – Diciembre de 2006. Entre esa fecha y Julio de 2009, las lecturas de niveles se realizaron mensualmente, en ocasión de las visitas a las microcuencas. La necesidad de estudiar las variaciones de niveles freáticos en función de la precipitación, en las microcuencas Don Tomás (forestal) y La Cantera (pastura natural), condujo a equiparlos, en Julio – Agosto de 2009, con limnógrafos de presión, marca TruTrack, modelo WT-HR 2000, con un rango de medición de la variación de niveles piezométricos de 2 metros, de modo de poder caracterizar la recarga y la descarga (natural y por evapotranspiración) (Aguilera y Murillo, 2007; Andreu et al., 2005; Custodio, 1997; Murillo et al.).

d) Infiltración

En los piezómetros ubicados en la microcuenca La Cantera (pasturas) se realizaron ensayos de infiltración. Para ello, se los lleno de agua hasta una altura próxima a la superficie del terreno y se registró la variación del nivel h en función del tiempo t (Custodio y Llamas, 1976).

La Figura 5 muestra el resultado del ensayo realizado en el piezómetro ubicado en una posición media en la microcuenca. La infiltración mínima constante se estimo en $f = 0,004$ cm/s (3,46 m/día). Los correspondientes valores para los piezómetros ubicados en la cabecera y próximo a la salida de la cuenca, en la posición baja, fueron $f = 0,003$ cm/s (2,59 m/día) y $f = 0,002$ cm/s (1,73 m/día).

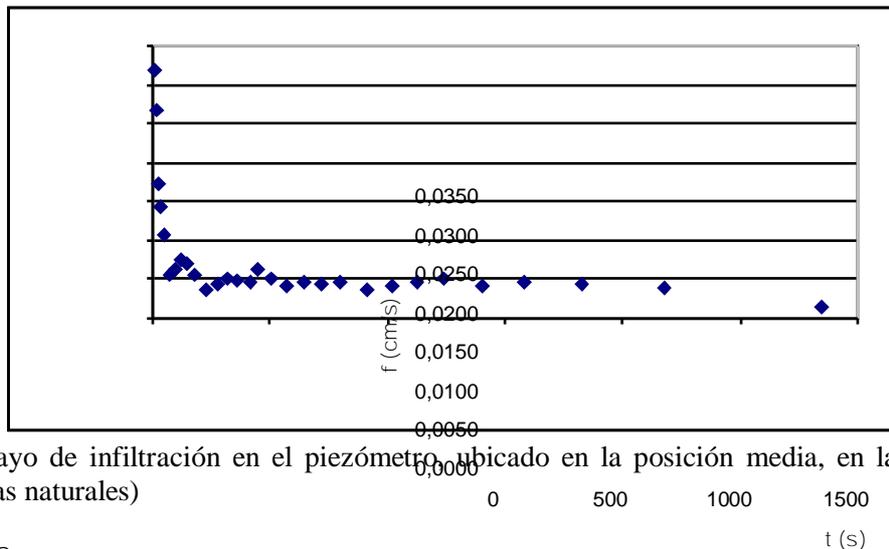


Figura 5.- Ensayo de infiltración en el piezómetro, ubicado en la posición media, en la microcuenca La Cantera (pasturas naturales)

RESULTADOS

Este trabajo se basa en la información continua de niveles piezométricos registrada entre Julio de 2009 y Abril de 2010. Las Figuras 6 a 8 muestran la respuesta de los niveles freáticos en los piezómetros ubicados en la posición baja (próxima a la salida), media (baricentro) y alta (cabecera) de las microcuencas bajo estudio. En particular, se observa una rápida respuesta del nivel freático frente a los eventos de lluvia.

En la Figura 6 se ilustra la profundidad de los niveles piezométricos (pastura – forestal), medida respecto a la superficie del terreno, y su variación en el tiempo, en los piezómetros ubicados en la zona baja de las microcuencas, que evalúan las areniscas arcillosas del tercio inferior de la Fm. Mercedes, a veces conglomerádicas, que pueden presentar cementación con sílice. El 18/11/2009 se registró un evento con 150 mm de precipitación, superior a la lluvia media histórica mensual en la zona. En la microcuenca forestal se tiene una respuesta (recuperación) de 1,57 m y 1,01 m en la microcuenca cubierta por pasturas naturales. La capacidad de infiltración y la porosidad eficaz del medio no explican este pronunciado ascenso, que puede deberse a su comportamiento combinado de medio permeable y medio por fracturación. En efecto, una porosidad eficaz de 20% requeriría una infiltración de 300 mm, respectivamente, 200 mm, para producir el ascenso observado. La curva inferior muestra la diferencia de niveles piezométricos entre las microcuencas. En el período Agosto-Noviembre de 2009, dominado por escasas precipitaciones en relación a la media histórica, la diferencia de niveles se mantiene estable, próxima a 2 m. A partir del evento de Noviembre de 2009, la diferencia se reduce a poco menos de 1 m, debido a la mayor recarga en la microcuenca forestal. El verano de Noviembre 2009 a Marzo 2010 es particularmente lluvioso, con anomalías por encima de la media histórica, manteniéndose la diferencia de niveles en el entorno del metro. La lectura combinada de las tres curvas muestra que, en un período lluvioso, la recarga es mayor en la microcuenca forestal. En Abril de 2010 no se registran precipitaciones de importancia, y claramente se observa un mayor descenso de los niveles en la microcuenca forestal, confirmando que en situaciones de déficit hídrico, el consumo de agua de los árboles incide sobre los acuíferos someros.

La Figura 7 compara los piezómetros ubicados en la posición media de ambas microcuencas, que evalúa la facies media de la Fm. Mercedes, correspondiente a conglomerados silificados. Para el mismo evento, del 18/11/2009, se tiene una recuperación (ascenso) similar en ambas coberturas, 2,12 m en la microcuenca forestal y 2,05 m en la microcuenca cubierta por pasturas naturales.

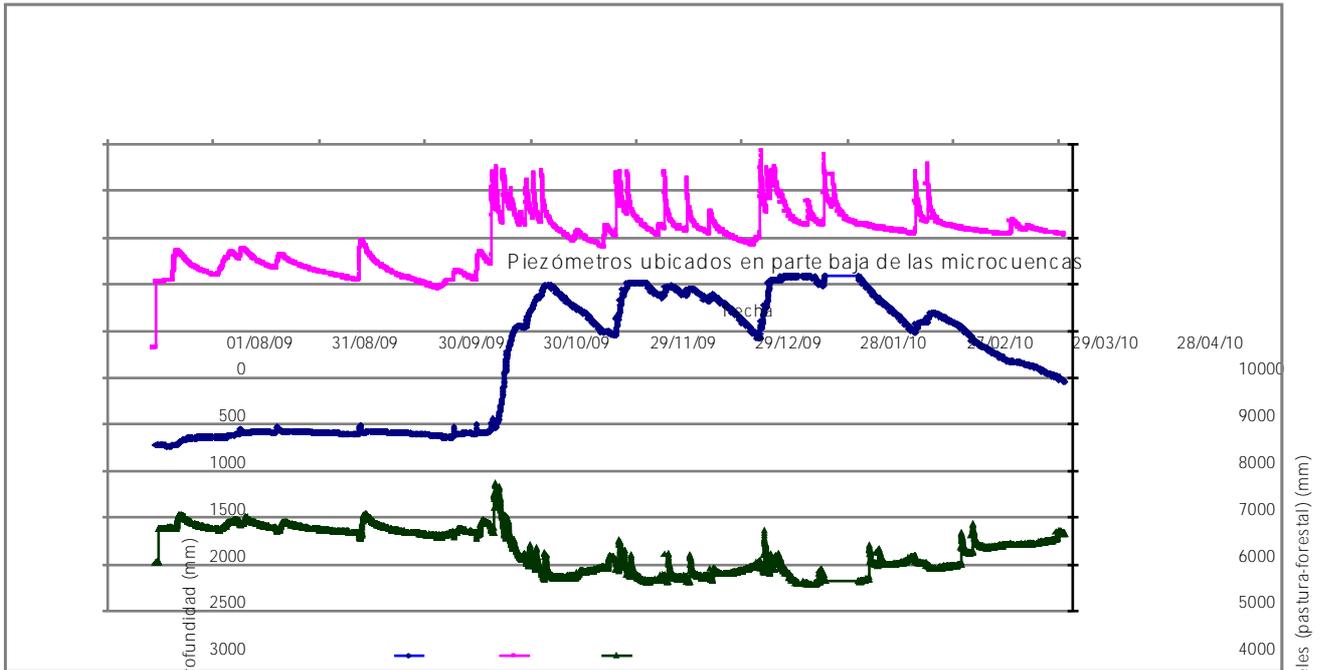


Figura 6.- Recuperación de niveles piezométricos, ubicación baja

3500
4000
4500
5000

Forestal Pastura Dif Pastura-Forestal

Dif de niveles (pastura-forestal) (mm)
10000
9000
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0

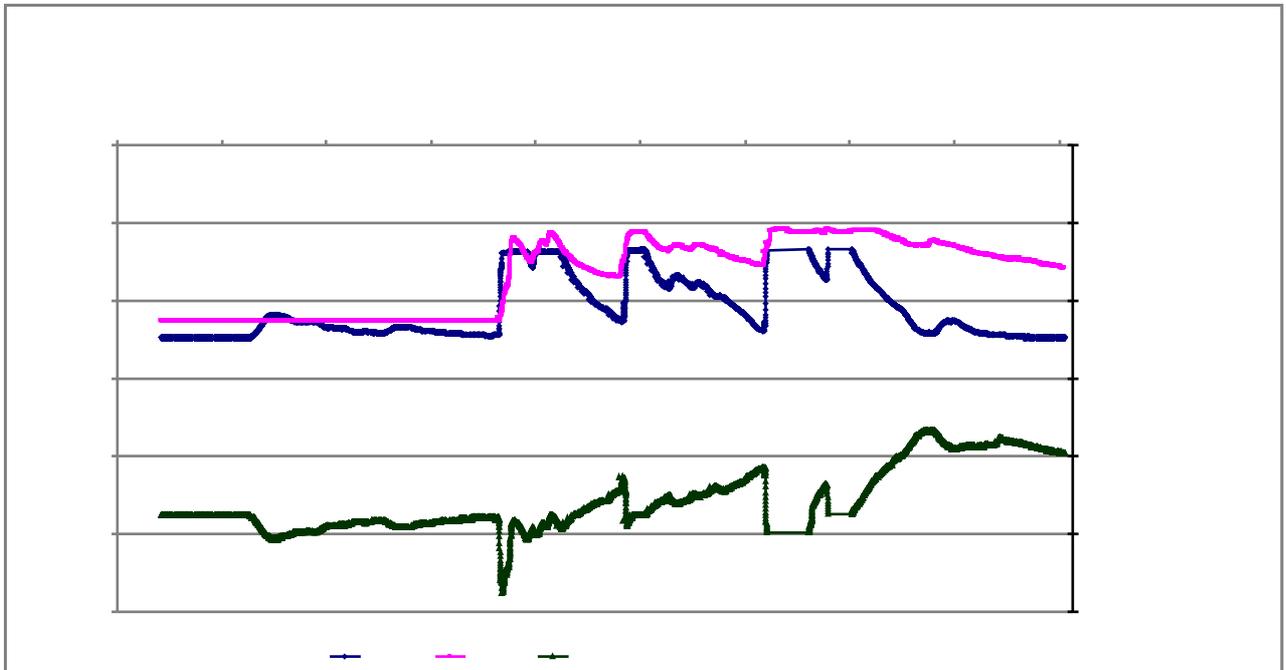


Figura 7.- Recuperación de niveles piezométricos, ubicación media

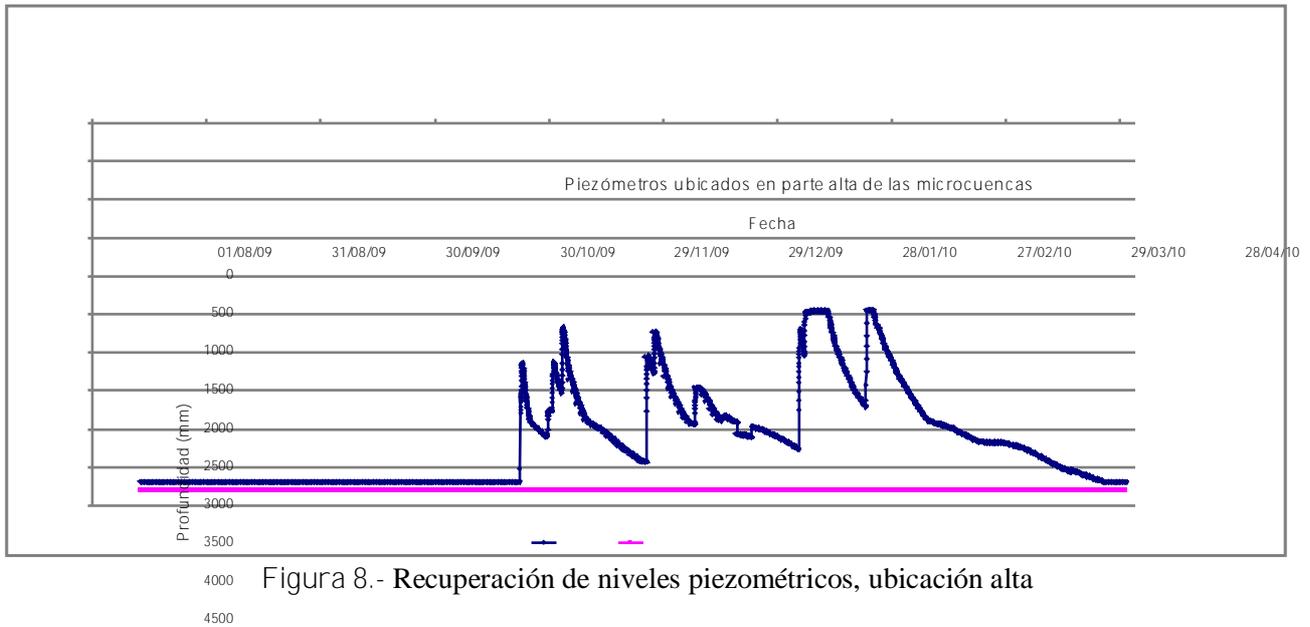


Figura 8.- Recuperación de niveles piezométricos, ubicación alta

Para el evento de Diciembre de 2009 se tiene una recuperación de niveles de 1,35 m en pasturas y 1,84 en la microcuenca forestal, y en Febrero de 2010, 0,81 m y 2,05 m, respectivamente. Es decir, la recarga en la microcuenca forestal es mayor a la que se registra en pasturas naturales. No obstante, a continuación de los eventos de Noviembre y Diciembre de 2009 y Febrero de 2010, es mucho más acentuado el descenso en la microcuenca forestal. La curva inferior, que ilustra la diferencia de niveles (pasturas-forestal) muestra que éstas son próximas a 0 (niveles similares) en el período de déficit hídrico (Agosto – Octubre de 2009) y en meses de primavera – verano muestra como se acentúa las diferencias a continuación de cada evento de lluvia, debido a los pronunciados descensos en la microcuenca forestal.

La Figura 8 presenta los niveles de los piezómetros ubicados en la cabecera de las microcuencas, que evalúan las litologías calcáreas del nivel superior de la Fm. Mercedes. Ambos piezómetros están situados a similar cota topográfica. La Figura 8 muestra que el piezómetro ubicado en la microcuenca La Cantera (pasturas naturales) permanece seco entre Agosto de 2009 y Abril de 2010, y que el piezómetro ubicado en la microcuenca Don Tomás (forestal) también permanece seco entre Agosto a Noviembre de 2009. A partir del evento de Noviembre de 2009, el piezómetro en la microcuenca forestal muestra una recuperación de niveles para cada evento de lluvia que se produce en la temporada de verano, entre Noviembre de 2009 y Febrero de 2010. En pasturas, el piezómetro permanece seco todo el tiempo. Esto parece confirmar que la cobertura forestal favorece la infiltración y, por lo tanto, la recarga. Asimismo, tratándose de temporada de verano, se observa que inmediatamente después que cesa la lluvia, se produce un rápido descenso de niveles.

CONCLUSIONES

El monitoreo continuo de niveles freáticos permitió observar una rápida respuesta frente a eventos de lluvia en ambos tipos de cobertura (forestal-pasturas), excepto en la cabecera de la microcuenca cubierta por pasturas, que permanece seco durante todo el período de monitoreo. En el período de verano, Noviembre 2009 – Febrero 2010, caracterizado por exceso de precipitaciones, por encima de la media histórica, se observa que la recarga (o recuperación de los niveles freáticos) es mayor en la microcuenca forestal. Esto es válido para las tres posiciones: cabecera, baricentro y posición baja, en la salida de las microcuencas. Probablemente se deba al enlentecimiento y menor escurrimiento superficial, producto de los residuos forestales existentes sobre la superficie del terreno. Asimismo, García Préchac et al. (2004) determinaron curvas características de retención de agua en el Uruguay y comprobaron que el suelo bajo *Eucalyptus* retiene menos agua a capacidad de campo y a todos los niveles de energía de retención aplicados. Delgado et al. (2006) señalan que estos resultados

coinciden con los obtenidos por Musto (1993), en un estudio similar en Sudáfrica, quién encontró las mismas diferencias de retención de agua entre suelos forestados y bajo pasturas, atribuyéndolo a diferencias en la distribución del tamaño de los poros y a la hidrofobicidad provocada por compuestos orgánicos en descomposición, presentes tanto en *Eucalyptus* como en *Pinus*. En los meses de verano, se observa que una vez que cesa el evento de precipitación, los descensos son mucho más pronunciados en la microcuenca forestal. Esto probablemente se deba a que el sistema radicular de los árboles es capaz de explorar un mayor volumen de suelo para satisfacer su demanda de agua. El ascenso de los niveles freáticos no está directamente asociado a la porosidad eficaz, estimada en un 20%, confirmando la existencia de fracturas o macroporos, de los conglomerados calcáreos identificados en los relevamientos geológicos. Si bien el número de eventos registrados es insuficiente aún para establecer conclusiones respecto al nivel de respuesta según la cobertura, los resultados son auspiciosos.

AGRADECIMIENTOS

La línea de investigación vinculada a los efectos de las plantaciones forestales sobre los recursos naturales aguas y suelos, se inició por iniciativa de la Dirección General Forestal, del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Posteriormente, se mantuvo con el apoyo de la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República. Actualmente, los estudios que se presentan en este artículo, han sido financiados por el Programa de Desarrollo Tecnológico (PDT) y el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA).

REFERENCIAS

Aguilera, H.; Murillo, J.M. (2006) "Estimación de la recarga natural en cuatro acuíferos kársticos del alto Vinalopó (Alicante) y relación con el cambio climático." *Boletín Geológico y Minero*, 117 (Núm. Monográfico Especial): 601-604. ISSN:0366-0176.

Andreu, J. M.; Pulido-Bosch, A.; García-Sánchez, E.; Vallejos, Á.; Bellot, J.; Chirino, E. (2005) "Contribución del control automatizado de la piezometría a la mejora de la gestión del acuífero del Ventós-Castellar (Alicante)." *Jornadas Internacionales: De la toma de datos y la realización de modelos de agua subterránea a la gestión integrada*. Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Grupo Español, Alicante, España.

Custodio, E.; Llamas, M.R. (editores) (1976) *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega S.A. ISBN 84-282-0446-2.

Custodio, E. (1997) "Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre." En: *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica* (Custodio, E., Llamas, M.R., Samper, J.). Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Grupo Español. Las Palmas de Gran Canaria, 19-39.

Delgado, S.; Alliaume, F.; García Préchac, F.; Hernández, J. (2006) "Efecto de las plantaciones de *Eucalyptus* sp. Sobre el recurso suelo en Uruguay." *Agrociencia*, Vol. X N° 2: 95-107.

García Préchac, F.; Amarante, P.; Delgado, S.; Salvo, L.; Hill, M.; Clérice, C.; Califra, A.; Pérez Bidegain, M. (2004) "Efecto de la intensidad de laboreo para la plantación de *Eucalyptus dunnii* sobre la acumulación de biomasa aérea, el crecimiento radicular y algunas propiedades físicas y químicas del suelo." *Agrociencia* 5(1): 1-9.

Murillo Díaz, J.M.; De la Orden Gómez, J.A.; Roncero Pinar, F.J. "El modelo "ERAS", una herramienta sencilla para estimar la recarga a los acuíferos que tienen una respuesta rápida." ([REDACTED])

Musto, J. (1993) "Impacts of plantation forestry and soil management. In: Institute for Commercial

Forestry Research – South Africa.” *Annual Research Report* 1993, pp 102-109.

Panario, D.; Mazzeo, H.; Eguren, G.; Rodríguez, C.; Altesor, A.; Cayssials, R.; Achkar, M. (2006) “**Síntesis de los efectos ambientales de las plantas de celulosa y del modelo forestal en el Uruguay.**” *Informe de la Facultad de Ciencias, Universidad de la República.*

Pérez Arrarte, C. (2007) *Plantaciones forestales e impactos sobre el ciclo del agua. Un análisis a partir del desarrollo de las plantaciones forestales en Uruguay.* Grupo Guayubira. ISBN: 978-9974-8030-0-8.

Schipilov, A. (2006) “**Geología del área de estudio. Carta 1/50.000**”, en *Informe Final del Proyecto PDT 32/03 Indicadores hidroambientales de manejo forestal sustentable de las plantaciones de Eucalyptus en el Uruguay.*