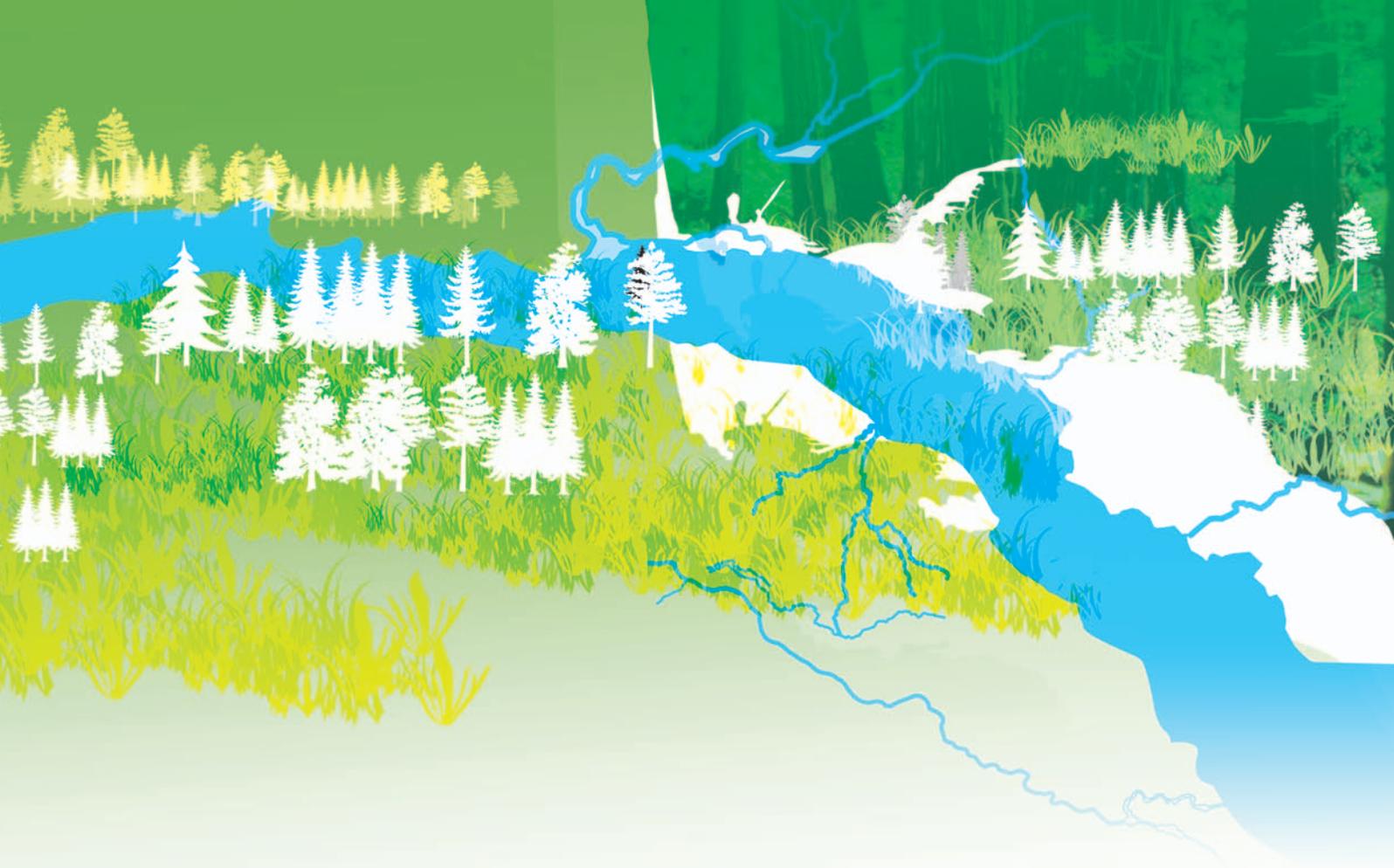


Las forestaciones rioplatenses y el agua

Esteban G Jobbágy, Marcelo D Noretto,
Grupo de Estudios Ambientales - Universidad Nacional de San Luis y CONICET

José M Paruelo, Gervasio Piñeiro
IFEVA - Facultad de Agronomía, UBA, y CONICET



Las forestaciones plantean nuevas oportunidades productivas, pero también compromisos con servicios esenciales que los ecosistemas brindan, tales como la provisión de agua potable o la regulación hidrológica de cuencas.

Posiblemente, la mayoría de nosotros al imaginar escenas de naturaleza prístina evocamos en primer lugar a los bosques o las selvas. En nuestra cultura los árboles ocupan un lugar especial como símbolo de 'naturaleza' y poseen por lo general una valoración ética y estética más positiva que otros tipos de plantas. Es interesante notar, sin embargo, que una parte importante del territorio de la Argentina y el Uruguay (véase el recuadro 'Forestaciones rioplatenses') ha tenido como vegetación original a pastizales que, por su casi absoluta carencia de árboles, sorprendieron a viajeros experimentados como Félix de Azara y Charles Darwin, como consta en sus pioneras descripciones de la región.

Los pastizales del sur de Sudamérica han sido reemplazados en gran proporción por cultivos anuales y pasturas implantadas y sus áreas remanentes fueron pastoreadas por vacas, ovejas y caballos por más de tres siglos. A pesar de estas profundas transformaciones, casi todo el territorio ha mantenido una fisonomía predominantemente herbácea (de carente o escasa vegetación leñosa) hasta el presente. Por más de un siglo los árboles introducidos en chacras y estancias se han mantenido circunscriptos a sectores reducidos y aislados entre sí. Esta realidad ha estado cambiando en parte de nuestros pastizales durante las últimas tres décadas como resultado del avance de las plantaciones forestales comerciales (véase el recuadro 'Forestaciones rioplatenses').



Forestación recientemente incendiada en Córdoba. El incendio desencadenó un severo proceso de erosión.

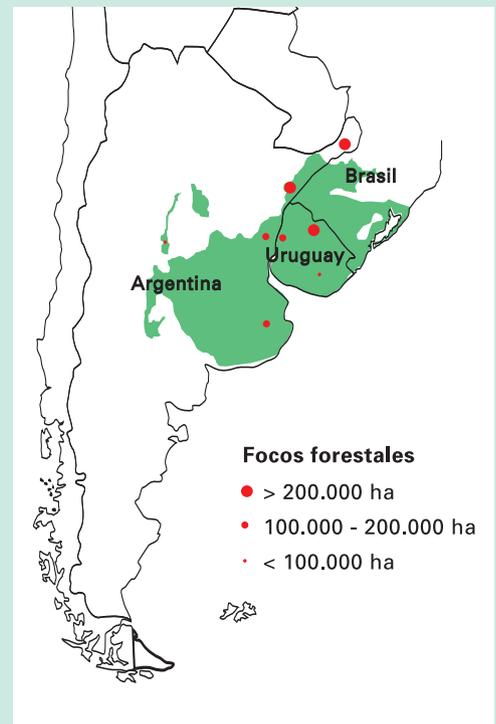
Este nuevo uso de la tierra, aplicado a áreas originalmente cubiertas por pastizales y destinadas típicamente a la ganadería o la agricultura, involucra fuertes cambios en el funcionamiento del ecosistema. Las forestaciones plantean nuevas oportunidades productivas, pero también compromisos con servicios esenciales que los ecosistemas brindan, tales como la provisión de agua potable o la regulación hidrológica de cuencas. Estos servicios, si bien no tienen hoy un precio en el mercado, poseen un indiscutible valor para la sociedad. Las páginas que siguen plantean brevemente las características de la expansión forestal de las últimas décadas en

Forestaciones rioplatenses

Las forestaciones en las cercanías del Río de la Plata se han establecido principalmente reemplazando pastizales naturales (área verde de la figura) y siguiendo un patrón de distribución agregado, en el cual, determinadas regiones con condiciones ambientalmente propicias para su desarrollo se convirtieron en focos de intensa actividad forestal. Actualmente, la superficie forestada en la Argentina se aproxima al millón de hectáreas mientras que en el Uruguay el área asciende a 700.000 ha. En las últimas tres décadas el apoyo fiscal juntamente con la necesidad creciente de productos forestales, ha determinado un fuerte incremento en las tasas anuales de plantación, tanto es así que en la Argentina estas han quintuplicado en el período 1992-2001 (se pasó de 23.000 a 125.000 has plantadas anualmente). En el Uruguay el proceso ha sido aún más intenso ya que la tasa anual de

plantación saltó de 2500 ha (1975-1988) a 50.000 ha en la última década. Las especies utilizadas son usualmente exóticas de rápido crecimiento, dentro de las cuales pinos y eucaliptos representan las de mayor difusión, con el 40 y 48% respectivamente. Considerando que la superficie con aptitud forestal asciende a los 47 millones de hectáreas, de las cuales solo el 5% se encuentra actualmente forestado, y que una gran proporción de estas tierras no posee buena aptitud agrícola, el mantenimiento de esta acelerada expansión del área forestada se presenta como un escenario altamente probable.

Figura 1. Distribución original de los pastizales rioplatenses. Se superponen los principales focos forestados de la Argentina y el Uruguay.



Muestreo de suelo en una plantación de eucalipto en la pampa deprimida.

los pastizales del Uruguay y la Argentina y revisan las consecuencias de este tipo de transformaciones sobre la dinámica del agua en los ecosistemas y su posible impacto sobre la provisión de agua y la regulación hidrológica de los paisajes que ocupan.

Impulsores de la forestación

Desde la década de 1970 las leyes federales que promueven la forestación con especies de crecimiento rápido (típicamente pinos, eucaliptos y salicáceas –álamos y sauces–) impulsaron las plantaciones en vastas áreas de pastizal en el Uruguay y la Argentina, llevando a la actividad a ser el único uso de la tierra subsidiado fiscalmente en estos países. En los comienzos, los proyectos iniciados se basaron en inversiones nacionales y generalmente se integraron a procesos industriales locales. En la década de 1990 numerosas compañías multinacionales se convirtieron en los mayores inversores, concentrando buena parte del área forestada. Una porción importante de su producción se exporta para uso de la industria papelera en otros continentes. Las plantas industriales proyectadas y en construcción en la margen oriental del río Uruguay al momento de escribirse este artículo, procesarían

Balance hídrico del ecosistema

En la mayoría de los ecosistemas terrestres los únicos ingresos de agua provienen de la precipitación (lluvia, nieve). La precipitación que ingresa a una parcela puede seguir dos caminos fundamentales: evaporarse y regresar a la atmósfera (salidas evaporativas) o abandonar la parcela en forma líquida (salidas líquidas) alimentando cuerpos de agua superficiales (arroyos, lagunas) o subterráneos (acuíferos). Esto puede caracterizarse por una simple ecuación de balance hídrico que reconoce que toda el agua que ingresa al sistema debe abandonarlo de alguna forma:

$$\text{Precipitación} = \text{Salidas evaporativas} + \text{Salidas líquidas}$$

Una expresión más detallada del balance hídrico contempla distintas vías de salida evaporativa y líquida y reconoce además el hecho de que los ecosistemas son capaces de almacenar cierta cantidad de agua.

$$\text{Precipitación} = I + ED + T + ES + D + \Delta S$$

Los componentes evaporativos de este balance son la intercepción (I), que es el agua que tras una lluvia moja la

superficie de las plantas y permanece allí hasta ser evaporada; la evaporación directa del suelo (ED), que es el agua que moja el suelo y se evapora desde su superficie; y la transpiración (T), que es el agua que tras ingresar al suelo es absorbida por las raíces y entregada a la atmósfera como vapor por las hojas. En sistemas húmedos T representa la principal vía evaporativa mientras que en desiertos o zonas muy descubiertas de vegetación ED puede ser mayor. Las salidas líquidas involucran al escurrimiento superficial (ES), que es el agua que antes de ingresar al suelo se desplaza lateralmente y abandona la parcela y la que alimenta en forma más rápida los cuerpos superficiales de agua; y el drenaje profundo (D) que es el agua que tras haber recorrido el suelo de la parcela hacia abajo escapa del alcance de las raíces más profundas y pasa, en la mayoría de los casos, a formar lo que los hidrólogos conocen como recarga subterránea, es decir la alimentación de acuíferos. Finalmente el balance incluye a los cambios de almacenamiento del agua líquida alojada en el suelo (ΔS). En sistemas húmedos el suelo no es capaz de almacenar más que la precipitación de unos pocos meses por lo que este componente es relevante cuando se

analizan cambios de corto plazo pero pierde importancia cuando la escala de análisis es mayor al año.

Estas ecuaciones muestran múltiples 'ventanas' a través de las cuales los científicos pueden explorar cómo las transformaciones de un ecosistema afectan su partición vapor/líquido. Por ejemplo, es posible monitorear los cambios en las salidas evaporativas a partir del balance de energía de la superficie basándose en registros satelitales de temperatura (las superficies que evaporan más están más frías). Si las áreas transformadas abarcan cuencas bien definidas en las que todas las salidas líquidas terminan alimentando arroyos, es posible caracterizar los cambios a partir de mediciones de su caudal. En el caso de paisajes muy planos en los que el escurrimiento superficial suele ser despreciable, se pueden evaluar alteraciones en la partición vapor/líquido a partir de la impronta que los cambios en el drenaje profundo generan sobre los niveles de las capas freáticas. En este artículo se aplican estas aproximaciones complementarias para explorar los efectos del establecimiento de árboles en pastizales sobre la dinámica del agua.

esta producción exportando pasta de celulosa para la manufactura de papel en los países de mayor consumo de este.

Al margen de los incentivos económico-políticos que han estimulado a la forestación, la oportunidad de lograr altos rendimientos de biomasa en tierras de pastizales sin posibilidades de uso agrícola ha sido sin duda un aliciente clave para su expansión. Forestaciones de eucaliptos y pinos en Corrientes, Entre Ríos y Uruguay muestran valores de productividad primaria (tasa de producción de material vegetal por unidad de superficie) que duplican o triplican a las de los pastizales que reemplazan, como lo sugieren algunas mediciones de campo para los componentes aéreos de las plantas (estos estudios ignoran el componente subterráneo) y más de un centenar de estimaciones realizadas sobre imágenes satelitales de la actividad fotosintética, recientemente efectuadas por nuestro equipo.

Es importante destacar que la presencia de pastizales naturales remanentes en la Argentina y el Uruguay se asocia fundamentalmente a la existencia de distintos tipos de limitaciones que han impedido el desarrollo de cultivos (rocosidad, inundación, salinidad, presencia de sustratos muy arenosos o arcillosos, constituyen algunas de estas barreras). Las mediciones de productividad primaria mencionadas y los rendimientos de madera registrados sugieren que estas limitaciones no afectan en forma importante a los sistemas forestales, y han ofrecido, en cambio, la posibilidad de lograr muy buenas producciones en campos que, por estar tradicionalmente limitados al uso ganadero, albergaban tierras de menor valor que las agrícolas.

Por otra parte, los incrementos que genera la forestación en la producción primaria podrían cobrar un valor adicional ante la posible consolidación y crecimiento de un mercado de bonos de car-

bono, estimulado por la entrada en vigor del protocolo de Kioto. La mayor ganancia de carbono de estos sistemas, acompañada por su retención más prolongada en los tejidos vegetales leñosos respecto de los herbáceos, podría traducirse en una acumulación neta de carbono en las forestaciones que reemplazan pastizales de considerable valor comercial en el futuro.

Forestación de pastizales y agua: panorama global

El proceso de producción primaria de un ecosistema terrestre involucra el intercambio de gases con la atmósfera. Este intercambio no se limita a la captura de dióxido de carbono y liberación de oxígeno resultante de la actividad fotosintética, sino que también involucra ineludibles pérdidas evaporativas de agua a lo largo del continuo suelo-raíz-tallo-hoja-atmósfera, conocidas como transpiración (véase el recuadro 'Balance hídrico de un ecosistema'). Este flujo hídrico, necesario para asegurar el proceso fotosintético y mantener el balance térmico de los vegetales terrestres, explica la estrecha relación entre la disponibilidad de agua y la producción primaria verificada en todos los continentes. En general los sistemas dominados por árboles pueden sostener tasas de transpiración más altas que

aquellos dominados por plantas herbáceas por dos causas esenciales: comparados con los pastos y hierbas, los árboles tienen un mejor acceso al agua del suelo gracias a sus sistemas radicales más profundos y poseen a la vez una capacidad evaporativa mayor como resultado de una estructura aérea más elevada y rugosa que facilita el intercambio gaseoso con la atmósfera. El hecho de que las especies de mayor importancia forestal sean siempreverde añade un componente adicional, que es la capacidad de mantener niveles altos de intercambio de gases con la atmósfera durante la estación invernal cuando muchos sistemas de pastizal reducen sensiblemente su actividad.

Sobre la base de las diferencias planteadas, se puede anticipar que el establecimiento de árboles en sistemas herbáceos aumentaría la proporción del agua de lluvia que abandona el ecosistema por transpiración, restando importancia a los otros destinos posibles caracterizados por la ecuación de balance hídrico (véase el recuadro 'Balance hídrico de un ecosistema'). Bajo climas húmedos como el de los pastizales rioplatenses, donde la transpiración representa la principal vía de salida evaporativa de agua, un aumento en sus tasas se traduciría fundamentalmente en una reducción de los otros componentes líquidos del balance. Parte del agua de lluvia que abandonaba los pastizales por escurrimiento superficial y por drenaje profundo, abasteciendo acuíferos y cursos de agua, se liberaría ahora en forma de vapor. Cabría esperar entonces reducciones en los caudales de arroyos y/o en la recarga de los acuíferos de áreas de pastizales que han sido forestadas. Nuestra revisión de experiencias hidrológicas de este tipo en todo el mundo ha confirmado esta posibilidad.

A partir de una revisión exhaustiva de la literatura científica y de reportes técnicos de todo el mundo se identificaron estudios hidrológicos que comparaban pares de pequeñas cuencas de pastizales forestados (principalmente pinos y eucaliptos) y controles no forestados adyacentes. En los 26 pares analizados, que abarcaron cuatro continentes, se observó una reducción generalizada de caudal en los arroyos tras la forestación. En promedio, las forestaciones disminuyeron las salidas líquidas de agua en un 39% causando la reducción completa del caudal por al menos un año en cuatro casos. El impacto relativo de la forestación sobre el caudal de arroyos fue más fuerte en los lugares más secos (precipitación media anual menor a 1250 mm) debido a que, en estas condiciones, la evaporación es un factor de mayor peso en el balance hidrológico y un pequeño aumento de su porcentual se traduce en una gran disminución de las salidas líquidas (véase la figura 1). Especialmente

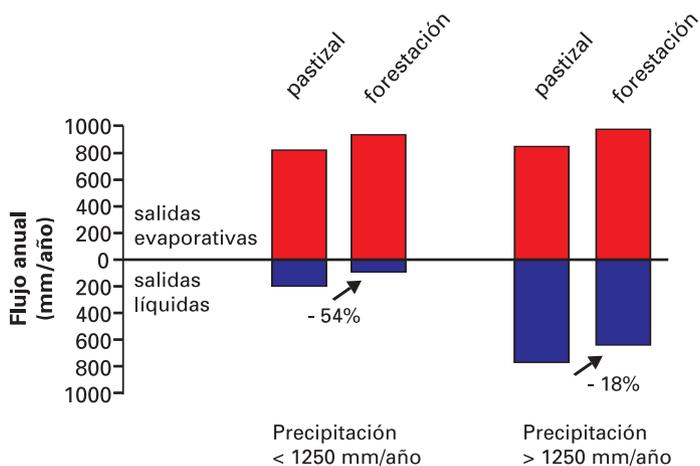


Figura 1. Partición del agua correspondiente a 26 pares de cuencas cubiertas por forestaciones y pastizales naturales de todo el mundo, los que fueron agrupados en dos categorías climáticas según la precipitación media anual. Las barras indican cuánto de los aportes de agua de la precipitación (suma de rojo y azul) recibido por pequeñas cuencas se asigna a salidas evaporativas (rojo) y líquidas (azul). Los porcentajes hacen referencia a la reducción relativa de las salidas líquidas, que se observó en áreas forestadas respecto de los pastizales.

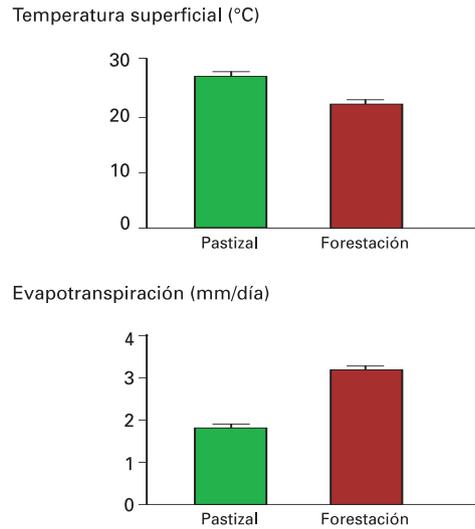
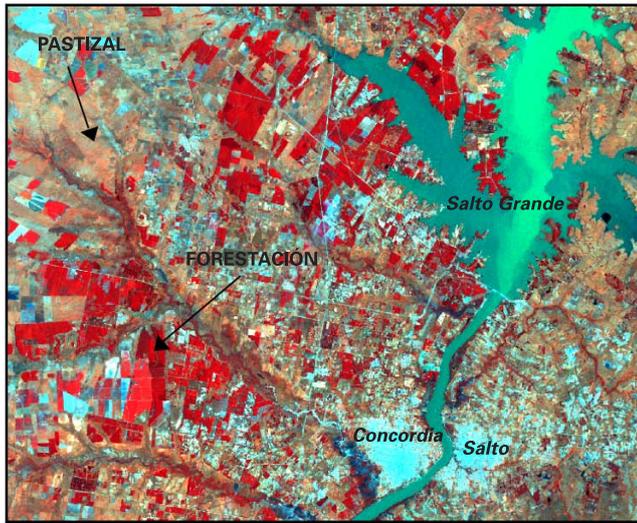


Figura 2. Imagen satelital LANDSAT de ambas márgenes del río Uruguay mostrando en tonos rojos una de las zonas de pastizales de la Argentina que ha sido más intensamente forestada. Usando información espectral visible y térmica proveniente de este tipo de imágenes se estimó la temperatura de la superficie y la emisión diaria de vapor de agua desde la superficie a la atmósfera (evapotranspiración). Las barras sintetizan los valores obtenidos en más de cien parcelas de pastizal y forestación.

impactante ha sido el resultado del establecimiento de plantaciones de pinos y eucaliptos en pastizales sudafricanos con menos de 1000 mm de precipitación anual, en donde se han registrado con frecuencia reducciones completas del caudal de arroyos que han llevado a esa nación, en la que la provisión de agua potable ha sido siempre crítica, a plantear la eliminación de las forestaciones ya establecidas en varias porciones del territorio. La síntesis de información hidrológica confirma que las forestaciones canalizan la mayor parte de las precipitaciones hacia salidas evaporativas. Los aumentos en la transpiración que acompañan a la excepcional productividad primaria de las forestaciones son la principal causa de este cambio y pueden plantear importantes costos hídricos locales y regionales cuando la superficie de pastizales que es forestada abarca una gran porción de las cuencas pareadas.

El fuerte consumo de agua por los bosques es largamente conocido, a tal punto que en el pasado se ha planteado a la forestación como una herramienta de regulación hidrológica de cuencas. Tras el establecimiento de plantaciones forestales en la cabecera de cuencas se esperaba lograr una disminución de los picos de máximo caudal tras lluvias grandes, reduciendo el peligro de inundaciones y una redistribución de estos potenciales excesos en el tiempo, capaz de generar caudales más constantes durante el año. Esta generalización se basó en estudios realizados en paisajes que siendo originariamente bos-

cosos fueron transformados en agrícolas o simplemente deforestados y degradados, pero debe ser cuidadosamente revisada cuando la transformación involucra el pasaje de sistemas herbáceos a forestaciones. En esta situación, si bien es posible que los caudales máximos se vean atemperados, resulta equivocado esperar una mayor oferta de agua durante épocas secas y por el contrario es previsible que en estos períodos se acrecienten las caídas de caudal. La situación original de la vegetación y el contexto en el que se implantan las forestaciones son factores determinantes de sus impactos.

Forestación de pastizales y agua: panorama local

Las imágenes satelitales permiten estimar las tasas de pérdida de vapor de agua de los ecosistemas terrestres combinando la información espectral visible, infrarroja cercana e infrarroja térmica de la superficie, con mediciones meteorológicas locales. Estas estimaciones integran a todas las salidas evaporativas de agua. Utilizando imágenes del satélite LANDSAT para siete fechas que cubrieron un rango amplio de condiciones meteorológicas, hemos estimado la evaporación diaria de 117 parcelas cubiertas por forestaciones o pastizales en la región de Concordia en Entre Ríos, una de las más intensamente forestadas de la Argentina (véase la figura 2).

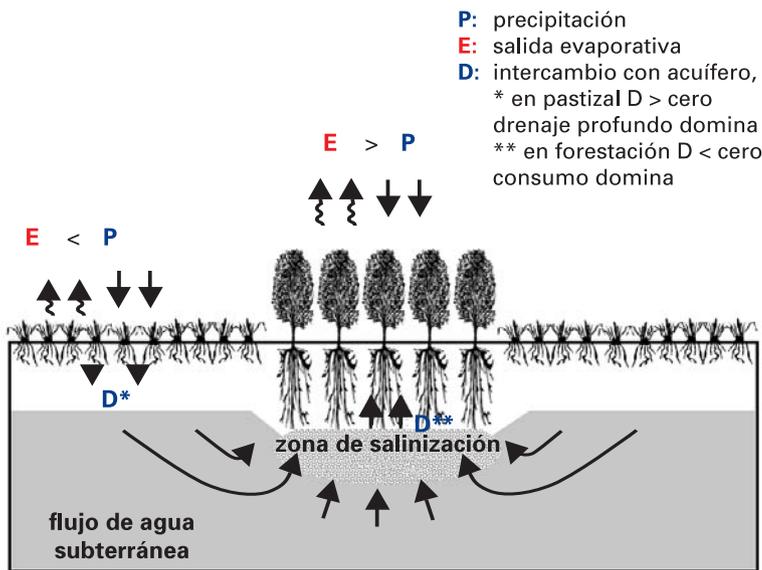


Figura 3. Síntesis esquemática del proceso de salinización desencadenado por forestaciones establecidas en pastizales naturales de la pampa húmeda. Bajo estos pastizales una fracción del agua de lluvia descende a lo largo del perfil del suelo, escapando del alcance de las raíces de los pastos y alimentando al acuífero freático. En las forestaciones la mayor demanda de agua junto a la distribución más profunda de las raíces genera un consumo de agua freática que permite sostener salidas evaporativas superiores a los ingresos por precipitación. Este proceso es alimentado por la transferencia de agua desde el pastizal hacia la forestación e implica la acumulación progresiva de sales en el agua y en el suelo profundo.

A pesar de su mayor absorción de radiación (menor reflexión), las forestaciones tuvieron temperaturas más bajas que los pastizales (fueron 5°C más frías en promedio), lo que se explica por un aumento de las salidas evaporativas de agua del 80%. La medición de este flujo en plantaciones de distintas edades mostró que solo dos años después de su establecimiento los montes de eucalipto superaron en su capacidad evaporativa a los pastizales y que en solo 4-5 años al menos las duplicaron. Si se proyectan los resultados del análisis satelital diario a la escala anual, se encuentra que de los 1350 mm/año provistos por la precipitación, los pastizales liberarían 720 mm/año en forma de salidas líquidas, mientras que las forestaciones liberarían solo 200 mm/año. Esta caída, mayor al 70%, podría afectar a los consumidores de agua potable localmente y a los de energía hidroeléctrica a nivel regional.

En situaciones en que el agua subterránea está cerca de la superficie, como sucede en gran parte de la pampa húmeda argentina, el reemplazo de pastizales por forestaciones puede no solo reducir o interrumpir completamente las salidas líquidas de agua del ecosistema hacia los acuíferos (véase D en el

recuadro 'Balance hídrico del ecosistema'), sino que también puede generar un flujo inverso, desde el acuífero hacia la superficie, para complementar a la precipitación, abasteciendo las necesidades hídricas de los árboles. En la segunda ecuación de balance hídrico planteada en el recuadro esto puede representarse como un valor de D negativo. El estudio del comportamiento de las capas freáticas (agua subterránea más superficial) en suelos forestados de la pampa ha mostrado que en muchas ocasiones los valores de D se vuelven negativos tras el establecimiento de árboles. Hemos reunido varias pruebas independientes de este cambio drástico en la hidrología. Observaciones detalladas de los niveles de capas freáticas en plantaciones forestadas y áreas adyacentes de pastizales, muestran que bajo las plantaciones forestales las capas freáticas se profundizan, generando desniveles de más de medio metro en solo una cuadra de distancia, explicables únicamente por un uso intenso del agua freática por la vegetación. Este comportamiento es análogo a las depresiones de capas freáticas que se producen por el bombeo continuo de agua subterránea (véase la figura 3). Registros horarios de nivel freático muestran un característico patrón de fluctuaciones diarias en las forestaciones pero no en los pastizales vecinos. Estos descensos diurnos y ascensos nocturnos de nivel, que pueden alcanzar hasta diez centímetros, son una prueba adicional del consumo de agua subterránea y muestran una muy buena correlación con estimaciones independientes de la transpiración de los árboles.

¿Es problemático el consumo de agua subterránea, o representa acaso un beneficio?

El descenso de los niveles de capa freática en muchas zonas de la pampa, frecuentemente afectadas por inundaciones, podría ser beneficioso. Para lograr dicho efecto, sin embargo, la regulación regional de los niveles solo se lograría forestando grandes superficies, posiblemente en el orden de decenas de kilómetros cuadrados. Las forestaciones estudiadas en la pampa, de solo diez kilómetros cuadrados como máxima superficie, sugieren que los niveles freáticos se estabilizan a no más de un metro por debajo de los valores originales gracias al aporte de agua subterránea desde áreas adyacentes de pastizal.

Sin embargo, la solución al problema de las inundaciones no es tan directa. Es importante advertir que junto a los cambios hidráulicos mencionados aparecen alteraciones muy importantes

en la salinidad de suelos y aguas que en este caso sí son claramente negativas.

En las posiciones más altas de la planicie pampeana, una fracción significativa de las lluvias alimenta los acuíferos manteniendo los suelos libres de sales y recargando a los acuíferos freáticos con aguas de muy baja salinidad, aptas para el consumo humano. Comparando parcelas pareadas de pastizal natural y forestación, distantes a solo cien metros entre sí, hemos hallado que en este tipo de situaciones topográficas las plantaciones forestales incrementan la salinidad de la capa freática de tres a treinta veces, elevándola en casi todos los casos por encima de los valores considerados seguros para el consumo humano (véase la figura 3). Al favorecer las salidas evaporativas de agua freática, las forestaciones deprimen las capas freáticas localmente, recibiendo nuevos aportes de agua desde zonas adyacentes que vienen, inevitablemente, acompañados por su carga de sales. Estas sales, a diferencia del agua que es evaporada, permanecen y se acumulan en el lugar. Como resultado de este proceso no solo la calidad del agua se deteriora, sino que además los suelos se salinizan y en la mayoría de los casos se vuelven fuertemente alcalinos. También hemos detectado este proceso en pastizales forestados en Hungría y otros científicos lo han documentado en Australia y Rusia. Afortunadamente en la Argentina y el Uruguay, áreas con pastizales que serían más propensas a la salinización en el caso de ser forestadas no han sido objeto aún de grandes iniciativas de este tipo. La intensidad del proceso de salinización mencionado podría reducirse con plantaciones de baja densidad capaces de mantener un menor consumo de agua freática y los sistemas silvopastoriles que combinan forestación con pastizales o pasturas subyacentes pueden representar un alternativa de menor impacto en estas regiones.

Por otra parte, además de la presencia de agua subterránea al alcance de las raíces de los árboles, la existencia de sedimentos de granulometría intermedia (limosos) es una de las condiciones necesarias para desencadenar el proceso de salinización. Los sedimentos arcillosos dificultan (o impiden) el flujo de reabastecimiento, mientras que los arenosos impiden la acumulación de sales por lavado frecuente. Otra condición necesaria es la existencia de un clima moderadamente húmedo en el que los niveles de precipitación no superen la capacidad evaporativa máxima de las forestaciones. Las condiciones planteadas se cumplen en la mayor parte de los pastizales rioplatenses pero excluyen a áreas tales como las zonas serranas, sin acceso al agua freática; los médanos de la costa atlántica, con suelos muy are-



Pequeña cuenca forestada con pinos en Córdoba. Los estudios de cuencas que se presentan en el trabajo provienen de situaciones similares a esta.

nosos, Entre Ríos y el noreste de la provincia de Buenos Aires, con dominancia de suelos muy arcillosos, y Corrientes y partes del Uruguay, con climas muy lluviosos, entre otras.

Otro aspecto que debe ser considerado en las áreas forestadas es el aumento de la retención de algunos nutrientes en la gran masa de tejido vegetal que se acumula y genera una redistribución de estos desde el suelo hacia las plantas. Esto es especialmente relevante para el calcio, elemento escaso en los tejidos de plantas herbáceas, particularmen-



Eucalipto en Entre Ríos.

te pastos, pero abundante en los tejidos de especies leñosas y más aún en los eucaliptos. La transferencia de calcio desde el suelo hacia las plantaciones de eucaliptos es acompañada por una liberación recíproca de acidez, causando un fuerte descenso en el pH de los suelos forestados de la región pampeana. Mediciones realizadas por nuestro equipo en áreas forestadas del Uruguay sugieren que este proceso ha causado la acidificación de arroyos en áreas forestadas sumando un impacto adicional a la reducción de caudal que suelen mostrar las plantaciones en las zonas estudiadas.

La importancia del contexto

Caracterizar a las forestaciones como un uso de la tierra inherentemente bueno, basándose, por ejemplo, en una mirada restringida a sus altos rendimientos, o malo, enfocando únicamente los costos hidrológicos aquí expuestos, llevaría a una polémica estéril. El análisis de la conveniencia de forestar o no un territorio debe reconocer la posible existencia de compromisos entre los productos y servicios que el ecosistema ofrece bajo distintos escenarios de uso, algo que varía según el contexto ecológico en el que se plantea el establecimiento de las plantaciones. Un mismo esquema forestal puede generar cambios de distinta magnitud y sentido en el funcionamiento del ecosistema si es aplicado en pastizales, tierras agrícolas degradadas, o bosques naturales que han sido deforestados en el pasado.

Una gran parte de la expansión forestal de las últimas décadas en las naciones rioplatenses se ha concentrado en áreas de pastizal. Esto implica impactos de la forestación sobre algunas propiedades de los ecosistemas, diferentes a los que podrían esperarse en regiones naturalmente boscosas o selváticas que son reforestadas. En este artículo nos hemos concentrado en el agua porque presenta una dimensión clave del funcionamiento de los ecosistemas y un nexo elemental entre ellos y las sociedades locales o a veces distantes. Las forestaciones establecidas afectan a este recurso al liberar como vapor hacia la atmósfera parte del agua que normalmente alcanzaría a los ríos y al acuífero. El mismo proceso puede ofrecer beneficios en sistemas que, habiendo sido originalmente boscosos, han sufrido severas alteraciones hidrológicas tras ser deforestados. El ejemplo más conocido a nivel mundial en este sentido es posiblemente el de las áreas de bosque seco de Australia que, tras transformarse en cultivos un siglo y medio atrás, sufrieron el síndrome denominado 'salinización de tierras de secano'. Este proceso involucró que bosques secos (precipitación de 400-800 mm/año) con flujos nulos de drenaje profundo, pérdidas evaporativas iguales a la precipitación (véase el recuadro 'Balance hídrico del ecosistema') y capas freáticas ubicadas a más de 50 metros de profundidad, se transformaran en cultivos anuales en los que el drenaje profundo pasó a ser un flujo importante, causando ascensos lentos pero constantes de las capas freáticas. Este problema silencioso mostró su cara cuando los acuíferos, originalmente muy profundos, asomaron sobre la superficie del paisaje trayendo consigo una alta carga de sales. Hoy Australia ha perdido una gran cantidad de tierras agrícolas como resultado de este proceso de salinización del suelo y la reforestación se plantea e implementa como una de las pocas soluciones al problema, mostrando resultados promisorios solo cuando más de tres cuartas partes de la superficie de las cuencas se reforestan.

A diferencia de Australia, la Argentina ve reemplazar masivamente sus áreas de bosques secos por agricultura recién en las últimas décadas, en parte gracias a su gran reserva de tierras en la pampa húmeda. Hasta donde los autores han podido indagar no hay evidencias claras de que el problema australiano esté aflorando en nuestro territorio pero se requiere una exploración urgente de esta posibilidad. Hemos constatado, sin embargo, que en San Luis los montes semiáridos han mantenido un drenaje profundo nulo a pesar del alto aumento de las precipitaciones del último siglo y que en cambio los terrenos destinados a la agricultura mostraron valores positivos de drenaje. En un contexto

'australiano' de cambios en el uso del territorio de bosques secos, la forestación, por las mismas razones que la vuelven cuestionable en pastizales, podría ser beneficiosa en paisajes agrícolas del cordón semiárido argentino (La Pampa, San Luis, Santiago del Estero, Chaco, etc.). Si bien en el estado actual del conocimiento ecológico e hidrológico de nuestros paisajes estas son solamente especulaciones, queremos resaltar que el contexto en el cual se plantea la forestación es de gran importancia a la hora de valorar sus impactos sobre el agua.

Mucho resta por aprender acerca de la dinámica del agua en sistemas forestados. Las investigaciones en curso en el territorio rioplatense y en otros lugares del mundo generan dudas y alertas que deben ser atendidas por los distintos actores incluyendo a productores, políticos, ambientalistas y científicos; pero muestran también caminos para reconciliar o incluso potenciar las facetas productivas y ambientales de las plantaciones forestales cuando se integran inteligentemente al contexto que las rodea. 



Esteban G Jobbágy

Ph.D, Duke University. Ingeniero agrónomo, Universidad de Buenos Aires. Co-Director, Grupo de Estudios Ambientales, IMASL, Universidad Nacional de San Luis-CONICET. Profesor Adjunto, Cátedra de Ecología, Facultad de Agronomía, UBA.
jobbagy@unsl.edu.ar
<http://gea.unsl.edu.ar>



Marcelo D Nosetto

Ingeniero agrónomo, Universidad Nacional de Entre Ríos. Auxiliar docente, Cátedra de Climatología, FCA-UNER. Becario doctoral, Grupo de Estudios Ambientales, IMASL, Universidad Nacional de San Luis-CONICET.
mnosetto@unsl.edu.ar
http://gea.unsl.edu.ar/cv_nosetto.htm



José M Paruelo

Ph.D, Colorado State University. Ingeniero agrónomo, Universidad de Buenos Aires. Co-Director, Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección, IFEVA, UBA-CONICET. Profesor Adjunto, Cátedra de Ecología, Facultad de Agronomía, UBA. paruelo@ifeva.edu.ar
<http://www.ifeva.edu.ar/~paruelo/>



Gervasio Piñeiro

Ingeniero agrónomo, Universidad de la República, Uruguay. Becario doctoral, Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección, IFEVA, UBA-CONICET.
pineiro@ifeva.edu.ar
<http://www.ifeva.edu.ar/es/miembros/pineiro.htm>

Agradecimiento

Las investigaciones presentadas en este artículo se llevaron adelante con el apoyo del Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI – CRN 2031, NSF – GEO 0452325), la Fundación Antorchas y el CONICET. Agradecemos la colaboración de Robert B Jackson, Kathleen Farley y Pedro Gundel.

Lecturas sugeridas

- FARLEY KA, JOBBÁGY EG y JACKSON RB, 2005, 'Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy', *Global Change Biology*, 10:1565-1576.
- GEORGE RJ, McFARLANE DJ y NULSEN B, 1997, 'Salinity Threatens the Viability of Agriculture and Ecosystems in Western Australia', *Hydrogeology Journal*, 5:6-21.
- JACKSON RB, JOBBÁGY EG, AVISSAR R, ROY SB, BARRETT D, COOK CW, FARLEY KA, LE MAITRE DC, MCCARL BA y MURRAY BC, 2005, 'Trading water for carbon with biological carbon sequestration', *Science*, 310:1944-1947.
- JOBBÁGY EG y JACKSON, 2004, 'Groundwater use and salinization with grassland afforestation', *Global Change Biology*, 10:1299-1312.
- NOSETTO MD, JOBBÁGY EG y PARUELO JM, 2005, 'Land use change and water losses: The case of grassland afforestation across a soil textural gradient in Central Argentina', *Global Change Biology* 11:1101-1117.

