

El efecto de las plantaciones forestales sobre el funcionamiento de los ecosistemas sudamericanos

The effect of tree plantations on south american ecosystems functioning

Germán Baldi¹
Marcelo D. Noretto²
Esteban G. Jobbágy³

Resumen

El establecimiento de plantaciones forestales sobre áreas bajo vegetación original o uso agrícola-ganadero se expande en la mayoría de los países de Sudamérica, incentivado por los altos rendimientos, el apoyo fiscal y por el inminente comercio de bonos de carbono. En este trabajo se evaluó cómo esta transformación afecta la producción de biomasa y la dinámica del agua sintetizando información preexistente y original. Mediciones satelitales muestran que el “Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas” (NDVI) de las plantaciones forestales superó a la de la matriz del paisaje agrícola-ganadera en todos los países y regiones ecológicas analizadas y –con excepción de los bosques valdivianos- a todos los tipos de vegetación original. A escala regional, este aumento en la productividad fue acompañado en el litoral del Río Uruguay por una mayor evapotranspiración y un menor rendimiento hidrológico que redujo a la mitad el caudal de cuencas forestadas, en acuerdo con lo observado en pastizales forestados de la región. Es apremiante generar información acerca de otros impactos de las forestaciones tales como cambios en la dinámica del fuego y el avance de especies invasoras. Reconocer integralmente la influencia de las forestaciones sobre la producción de servicios y bienes permitirá plantear sistemas y políticas forestales más sustentables y útiles para la sociedad.

Palabras-clave: cambio en el uso de la tierra; plantaciones forestales; sensoramiento remoto; NOAA-AVHRR; Landsat; evapotranspiración.

- 1 Grupo de Estudios Ambientales - IMASL, Universidad Nacional de San Luis e CONICET Ejército de los Andes 950, D5700HHW San Luis, Argentina; e-mail: baldi@unsl.edu.ar
- 2 Grupo de Estudios Ambientales - IMASL, Universidad Nacional de San Luis e CONICET Ejército de los Andes 950, D5700HHW San Luis, Argentina; e-mail: mnoetto@unsl.edu.ar
- 3 Grupo de Estudios Ambientales - IMASL, Universidad Nacional de San Luis e CONICET Ejército de los Andes 950, D5700HHW San Luis, Argentina; e-mail: jobbagy@unsl.edu.ar

Abstract

The establishment of tree plantations on natural or rangeland/cropland areas is increasing in many countries of South America, motivated by high production rates, governmental incentives and a prospective carbon market. In this work we evaluated how this land use transformation affects the primary productivity and the water dynamics, summarizing preexistent and original information. Satellite measurements showed that the “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI) of tree plantations exceeded that of the rangeland/cropland landscape matrixes in all analyzed countries and ecological regions. With the exception of the Valdivian forests, tree plantations also displayed higher NDVI values than the original vegetation types. At a regional scale, this increased productivity was accompanied –in the Río Uruguay margins- by higher evapotranspiration rates and consequently, lower water yields of the afforested catchments. It is urgent to generate information about other impacts of tree plantations such as changes in fire dynamics or invasive species. An integrative understanding of the influence of tree plantations on the production of goods and services will help to develop new forestry systems and policies that are more sustainable and useful for society.

Key words: land use changes; tree plantations; remote sensing; NOAA-AVHRR; Landsat; evapotranspiration.

Introducción

Existen distintos fenómenos de origen antrópico o natural que pueden modificar las características funcionales y estructurales de los ecosistemas, como la cantidad y la estacionalidad de la actividad fotosintética de la vegetación y, por lo tanto, su capacidad de generar biomasa vegetal (de aquí en adelante, “cambios funcionales”). Los cambios en el uso del suelo, las alteraciones climáticas, las migraciones humanas, las invasiones de especies, entre otros factores son los responsables principales de dichos cambios funcionales.

La transformación de la vegetación natural hacia plantaciones forestales de especies de rápido crecimiento se ha convertido en una actividad emergente a nivel global, con 187 millones de hectáreas en el año 2000. Sudamérica presenta, después de Asia, la tasa más alta de crecimiento de esta actividad, con 509.000 ha de nuevas forestaciones que se incorporan cada año. En el año 2000, la superficie forestada alcanzaba los 10,5 millones de hectáreas (46% eucaliptos y 45% pinos). Esta actividad se concentra en unos pocos sectores del continente, destacándose el centro-sur de Chile (regiones VI a X), los

estados brasileños de la región Sudeste (incluyendo Paraná), el litoral del Río Uruguay de la Argentina y el Uruguay, y el oriente de los Llanos de Venezuela. En estos sectores, la actividad toma especial relevancia ya que puede igualar o incluso superar en superficie a las actividades más tradicionales o extendidas en el continente como la agricultura o la ganadería. Asimismo, es posible que esta tendencia se mantenga o incremente en el futuro, debido al incipiente mercado de bonos de carbono.

Las consecuencias de estos cambios se manifiestan a distintas escalas espaciales y temporales, e incluyen modificaciones en diversos aspectos como los ciclos materiales (agua, C, N) y patrones de biodiversidad. En particular, el establecimiento de extensas áreas forestales puede comprometer la recarga de agua subterránea a escala de paisaje. Asimismo, la conversión de pastizales a forestaciones puede disparar eventos de salinización de los suelos y del agua subterránea en áreas de texturas intermedias. En un estudio a escala global que incorporó 26 cuencas hidrográficas forestadas con cuencas cubiertas por pastizales y arbustales, se encontró que la escorrentía anual se redujo en promedio un 44% y 31% cuando eran reemplazados pastizales y arbustales, respectivamente, y variando en relación a la precipitación total anual, siendo los sitios más secos los más afectados. Estas modificaciones a su vez llegan a afectar directamente el bienestar humano, comprometiendo el acceso a agua para consumo o riego.

En este trabajo compararemos –a escala continental- las características funcionales de las plantaciones forestales

con la de los sistemas mixtos agrícola-ganaderos y los ecosistemas nativos en Sudamérica. Luego presentaremos un análisis a escala regional en donde se evalúan las consecuencias que acarrea sobre el balance hídrico la implantación de forestaciones en un área originalmente ocupada por pastizales. Finalmente presentamos una iniciativa que busca identificar y comprender los cambios funcionales más relevantes de los ecosistemas terrestres de Sudamérica.

Materiales y Métodos

Las características funcionales de las plantaciones forestales –escala continental

Se utilizó el promedio anual del índice espectral “Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas” (NDVI, por sus siglas en inglés) como descriptor de la productividad primaria de la vegetación, una variable integradora del funcionamiento del ecosistema. Este índice ha sido ampliamente utilizado con este fin dado su sólida relación con la intercepción de radiación, que constituye el control principal de las ganancias de carbono de un ecosistema. Aunque el promedio es la variable más integradora, pueden ocurrir cambios en otras variables que no afecten significativamente a la media pero que tengan efectos importantes sobre el funcionamiento ecosistémico, por ejemplo, cambios en la fenología o en la memoria del ecosistema.

El análisis se condujo sobre sitios pareados de forestaciones y su matriz agrícola-ganadera circundante para 15 sitios distribuidos en seis países y nueve

ecoregiones de Sudamérica correspondientes a cinco biomas (Figura 1, Tabla 1). En los casos en que fue posible, se realizaron comparaciones entre los sistemas forestales y áreas protegidas cercanas. Se consideraron para este estudio sitios con una superficie mayor a las 5,000 hectáreas; se consideraron pares únicamente a sitios que se encontraban a menos de 25 km. del área bajo uso forestal. La información de NDVI provino de los sensores *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), a bordo de los satélites *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). En

particular, se eligió para este trabajo la serie de NOAA-AVHRR NDVI *Fourier-Adjustment, Solar zenith angle corrected, Interpolated Reconstructed* (FASIR, version 4.13) debido a la precisión y coherencia espacial de los resultados que ésta provee. Esta serie tiene una resolución espacial de 8 km, presenta características similares a la *Pathfinder AVHRR Land* (PAL), e incluye ajustes de Fourier de valores extremos y funciones de reflectancia bidireccional que llevan la información a una geometría de iluminación y ángulos de visión comunes. En función de reducir los posibles efectos

Figura 1. A) Localización de las regiones forestadas seleccionadas para el análisis continental, indicando el bioma. B) Localización de las plantaciones forestales y pastizales seleccionados para el análisis regional

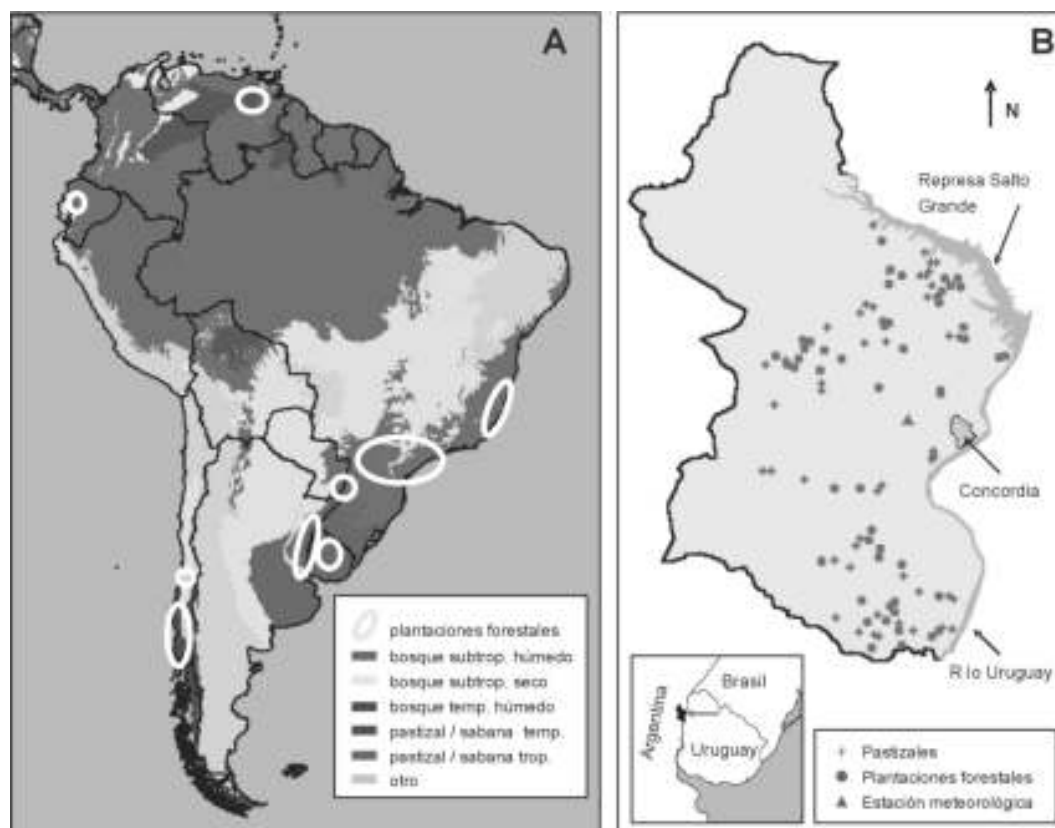


Tabla 1. Zonas utilizadas para la comparación entre plantaciones forestales, áreas agrícola-ganaderas y áreas protegidas. Superficie total forestada según datos estadísticos y principales especies forestales y porcentaje del total plantado (información sólo disponible para algunos pares)

Número de pares	Bioma	Ecoregión	País	Superficie forestada (1000ha)	Especies (%)
1	Pastizal y sabana trop.	Llanos	Venezuela	>615	<i>Pinus caribaea</i> (78%) <i>Eucalyptus spp.</i> (12 %)
1	Bosque subtrop. Húmedo	Bosque montano	Ecuador	60	<i>Eucalyptus globulus</i> <i>Pinus radiata</i>
2	Bosque subtrop. Seco	Cerrado	Brasil	4,430*	<i>Eucalyptus spp.</i> <i>Pinus spp.</i>
4	Bosque subtrop. Húmedo	Mata Atlántica			
1	Bosque subtrop. húmedo	Mata Atlántica	Argentina	196	<i>Pinus spp.</i> (92%) <i>Araucaria angustifolia</i> (5%)
1	Pastizal y sabana temp.	Sabana Mesopotámica	Argentina	96	<i>Eucalyptus spp.</i> (87%) <i>Pinus spp.</i> (12%)
1	Pastizal y sabana temp.	Pampa Húmeda y Sabana Uruguaya	Argentina / Uruguay	700	<i>Eucalyptus spp.</i> (86%) <i>Pinus spp.</i> (14%)
1	Pastizal y sabana temp.	Sabana Uruguaya	Uruguay	762	<i>Eucalyptus spp.</i> (57%) <i>Pinus spp.</i> (43%) <i>Pinus radiata</i> (33%)
1	Bosque subtrop. seco	Matorral	Chile	233	<i>Eucalyptus spp.</i> (31%) <i>Atriplex spp.</i> (26%)
2	Bosque temp. húmedo	Bosque Valdiviano	Chile	1,960	<i>Pinus radiata</i> (70%) <i>Eucalyptus spp.</i> (27%)

Fuente: Los nombres de las ecoregiones provienen de una simplificación de Olson et al.

* La información referente a la superficie forestada de Brasil no fue discriminada por ecoregión.

* The surface of the afforested area of Brazil was not discriminated by ecoregion.

de la baja calidad de algunos datos de NDVI (valores *off-nadir* y píxeles con contaminación por vapor de agua) en el cálculo de tendencias, se degradó la resolución temporal, llevándose de decádica a mensual, mediante la técnica de composición del máximo valor. El promedio anual se generó mediante los datos de los años 1998-1999, que se consideran años normales en relación a los fenómenos El Niño y La Niña de acuerdo al *Multivariate ENSO Index* (MEI) y *El*

Niño e La Niña Years: A Consensus List <<http://ggweather.com/enso/years.htm>>.

Las consecuencias sobre el balance hídrico de las plantaciones forestales – escala regional

La evapotranspiración (ET) es el principal componente del balance energético de la Tierra y constituye también un componente importante del ciclo hidrológico, explicando el 60% de la precipitación continental. A fin de

evaluar los cambios en la ET generados por el establecimiento de forestaciones, se seleccionaron lotes mayores a 10 ha ocupados por plantaciones de *E. grandis* (52 lotes) y pastizales naturales (48 lotes) en la costa argentina del Río Uruguay. Esta región posee un clima templado-húmedo con una temperatura media anual de 18,5 °C y una precipitación de 1352 mm año⁻¹. Para caracterizar los cambios en ET con la edad de la plantación, se escogió un conjunto independiente de 31 lotes de *E. grandis* ubicados en suelos de textura media que se extienden desde las etapas de plantación hasta la cosecha. Para evitar efectos de borde en los datos satelitales, se utilizaron los píxeles centrales de los lotes, excluyendo una franja de ~60 m desde el borde de la parcela.

Se utilizaron siete imágenes Landsat 7 ETM+ (escena WRS2 225/082) libres de nubes provistas por la CONAE. Las escenas, adquiridas a las 10:30 h (hora local), correspondieron a los siguientes días: 30/08/00, 18/11/00, 06/02/01, 11/04/01, 19/07/02, 26/12/02, y 27/01/03. Las imágenes fueron corregidas geométricamente utilizando el método de selección de puntos de control terrestre y aplicando una función polinómica de 2° orden (LILLESAND y KIEFER, 1994). Para minimizar los efectos atmosféricos, las bandas no térmicas se corrigieron utilizando la metodología de substracción de un objeto oscuro descrita por Chavez, y la banda térmica utilizando el algoritmo propuesto por Qin et al. 2001. Para la estimación de ET diaria se utilizó el denominado Método Simplificado. Éste calcula la ET diaria considerando la energía recibida por una superficie y la diferencia de temperatura

entre esta y el aire que la rodea utilizando la siguiente ecuación:

$$ET_{24} = Rn_{24} - B (T_s - T_a)^n$$

Nota: en donde ET_{24} (mm día⁻¹) y Rn_{24} (mm día⁻¹) son, respectivamente, la evapotranspiración actual y la radiación neta diaria, T_s (K) la temperatura de la superficie, T_a (K) la temperatura del aire a 50m de altura y B (mm día⁻¹ K⁻¹) y n parámetros que varían con el tipo de vegetación.

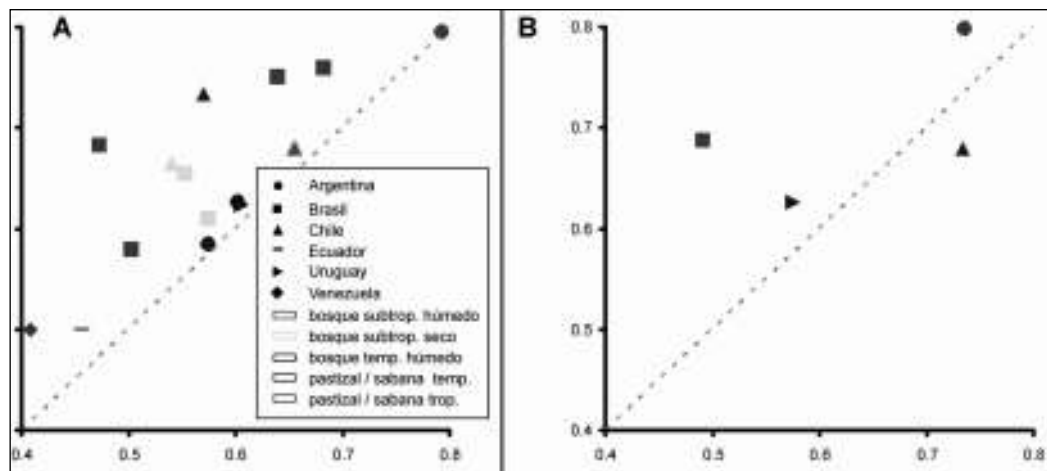
Resultados y Discusión

Las características funcionales de las plantaciones forestales –escala continental

Las plantaciones forestales presentaron en todas las zonas de estudio valores más altos que las matrices agrícola-ganadera circundantes (Figura2A). Las mayores diferencias se encontraron en las plantaciones forestales de Brasil sobre Mata Atlántica (Paraná, São Paulo, Espírito Santo), en donde los sistemas forestales presentaron un valor medio de NDVI 17% superior al de la matriz. Las menores diferencias las presentaron las forestaciones en áreas cubiertas por pastizales y sabanas templadas de la Argentina y el Uruguay. Es notable asimismo el bajo valor de NDVI que presentaron las forestaciones de Pinus caribea de Venezuela. Éstos se relacionarían con la baja fertilidad natural del sistema (suelos oligotróficos) y la ocurrencia de condiciones climáticas adversas (extremo déficit hídrico), encontrándose frecuentemente los individuos en condiciones de estrés fisiológico.

La comparación de los sitios bajo plantaciones forestales y áreas protegidas

Figura 2. Comparaciones entre las plantaciones forestales y: A) la matriz agrícola-ganadera circundante, B) las áreas protegidas



-que representarían el funcionamiento del ecosistema original- arrojó resultados sorprendentes, como el hecho de que las forestaciones presentasen valores más altos de NDVI en áreas de bosque subtropical húmedo (Figura 2B). Este hecho se relacionaría con que las forestaciones están compuestas por especies de rápido crecimiento (pinos y eucaliptos) y mantienen altas tasas de crecimiento hasta el momento de su cosecha. Asimismo, estos sistemas productivos reciben distintos tratamientos que tienden a maximizar la productividad al modificar las características físicas, químicas y biológicas del ambiente (fertilización, control de plagas) . Para el caso de las forestaciones en pastizales, estos resultados confirman lo expuesto por diversos autores que muestran, mediante mediciones de campo, que el cambio en esta actividad humana conlleva importantes modificaciones en la PPN del orden del 22% . En este caso, las diferencias podrían estar explicadas por la mayor disponibilidad de agua con

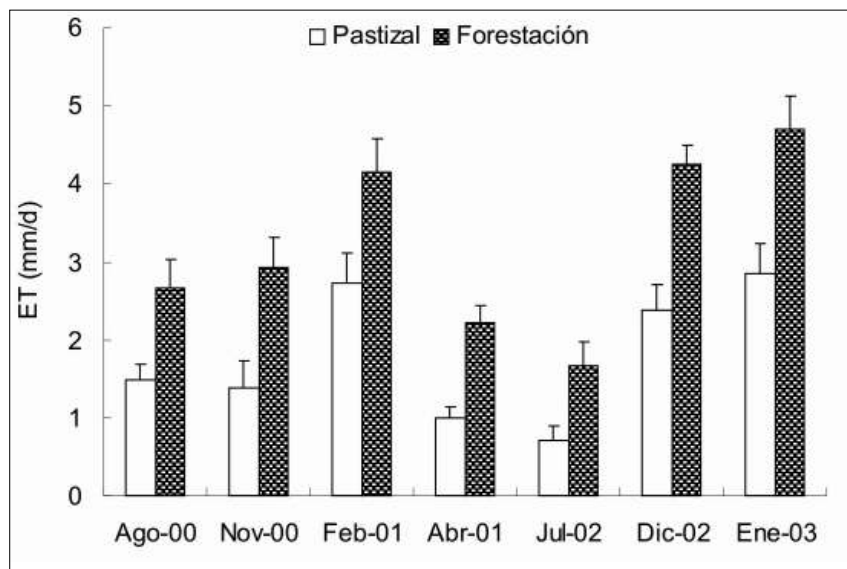
la que cuentan las forestaciones debido a sus raíces más profundas . El único caso en donde el NDVI de las forestaciones es menor que el de la vegetación original es el de los bosques valdivianos.

Las consecuencias sobre el balance hídrico de las plantaciones forestales –escala local a regional

A pesar de presentar menor albedo, y por lo tanto mayor radiación neta, la temperatura superficial de las forestaciones fue menor a la de los pastizales nativos. Esto indica un mayor enfriamiento evaporativo y una mayor pérdida evaporativa de agua en las plantaciones en todas las fechas analizadas (Figura 3). En promedio, las forestaciones utilizaron ~81% más agua que los pastizales, con diferencias absolutas de ET que variaron entre 1,87 mm d⁻¹ (26/12/2002) y 0,97 mm d⁻¹ (19/07/2002) (Figura 3) .

La ET también fue más estable a lo largo del tiempo en las forestaciones que en los pastizales. El coeficiente de variación temporal de ET fue significativamente menor

Figura 3. ET en pastizales naturales y en plantaciones de *E. grandis* en la costa del Río Uruguay, Argentina



en las forestaciones en comparación con los pastizales (36,5 y 49,2%, respectivamente; $p < 0,0001$). Cuando se comparan los valores de ET en dos fechas con similar radiación neta ($18/11/2000 = 14,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y $06/02/2001 = 12,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) pero con distintas condiciones de disponibilidad hídrica, como lo indica el balance entre precipitación y evaporación de tanque de los 18 días previos ($18/11/2000 = -24,5 \text{ mm}$ y $06/02/2001 = +3,6 \text{ mm}$), se observa que la respuesta de la ET en forestaciones y pastizales fue diferente. Mientras que en las plantaciones la ET aumentó ~40%; en los pastizales, la tasa de ET se duplicó.

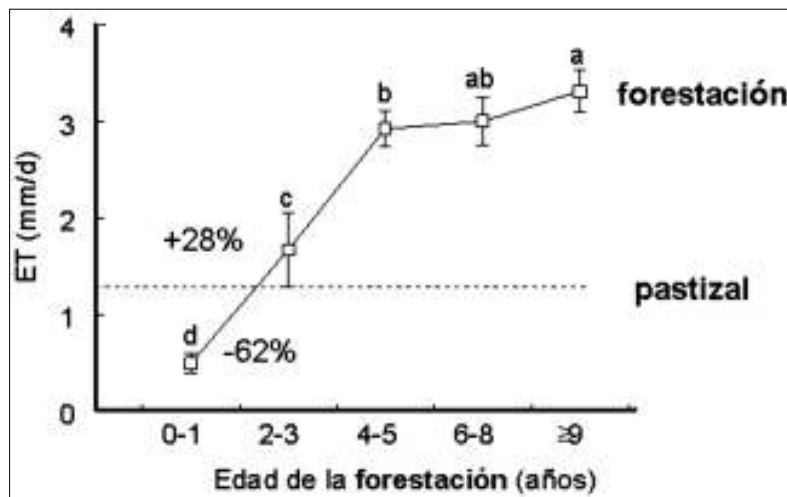
La tasa de ET de las forestaciones aumentó rápidamente luego del establecimiento de las mismas, y superaron a los pastizales en menos de 3 años (Figura 4). En el período de 0-1 años de edad, las forestaciones utilizaron 62% menos agua que los pastizales ($p < 0,05$), mientras que en el siguiente rango de edad

(2-3 años) las forestaciones utilizaron 28% más agua ($p < 0,05$).

Conclusiones

Las forestaciones muestran una mayor interceptación de radiación fotosintéticamente activa que los sistemas agrícola-ganaderos que reemplazan y en casi todo los casos, también mayor que la de la vegetación natural en áreas protegidas. Esto sugiere que las plantaciones forestales aumentarían la producción primaria neta en casi todas las circunstancias. Las causas de este incremento de productividad pueden ser múltiples e incluyen mayor uso de recursos y/o mayor eficiencia. En términos productivos la actividad forestal permitiría un aprovechamiento más exhaustivo de la producción primaria respecto a la de la mayoría de los sistemas ganaderos, al destinarse en ellos una fracción menor

Figura 4. Evolución de ET en la rotación forestal. Las letras indican diferencias significativas en relación a las clases etareas ($p < 0,05$)



de la misma a estructuras subterráneas que no pueden ser cosechadas. A escala regional o continental (con implicancias a escala global) esto también implica una ventaja al capturar más CO_2 atmosférico, lo que estaría fomentado por el Protocolo de Kyoto. En éste se establece que los países en vías de desarrollo pueden mitigar el efecto de sus emisiones de este gas mediante la captura adicional del mismo mediante, por ejemplo, plantaciones forestales. Esta ventaja podría tornarse -sin embargo- negativa desde la perspectiva del secuestro de carbono y su acumulación en el suelo como materia orgánica, ya que el secuestro depende principalmente de los aportes de biomasa vía raíces (especialmente en profundidad).

La identificación de los mecanismos y las condiciones ambientales que describa los impactos hidrológicos de las plantaciones forestales, tales como el consumo y posible salinización del agua subterránea es crítica para orientar la elección de tierras para esta actividad y garantizar su mínimo efecto sobre la

provisión de agua. Como se ha demostrado aquí y en otros trabajos, las forestaciones pueden potencialmente competir por el agua con otras actividades productivas o con el uso para consumo humano, especialmente en pastizales donde pueden incrementar la evapotranspiración entre 40 y 80%.

Es apremiante generar información acerca de otros impactos de las forestaciones tales como cambios en la dinámica del fuego y el avance de especies invasoras. Reconocer integralmente la influencia de las forestaciones sobre la producción de servicios y bienes permitirá plantear sistemas y políticas forestales más sustentables y útiles para la sociedad.

La Iniciativa Lechusa

La iniciativa LechuSA (Land ecosystem change utility for South America, <<http://lechusa.unsl.edu.ar>> es un espacio colaborativo en red que busca identificar y comprender los cambios funcionales más relevantes de los ecosistemas terrestres de

Sudamérica, como el caso particular de las plantaciones forestales presentado aquí. Para alcanzar este objetivo, presentamos mapas de cambios funcionales, alentando la participación de expertos locales capaces de reconocer la naturaleza y las causas de dichos cambios a través de foros en red.

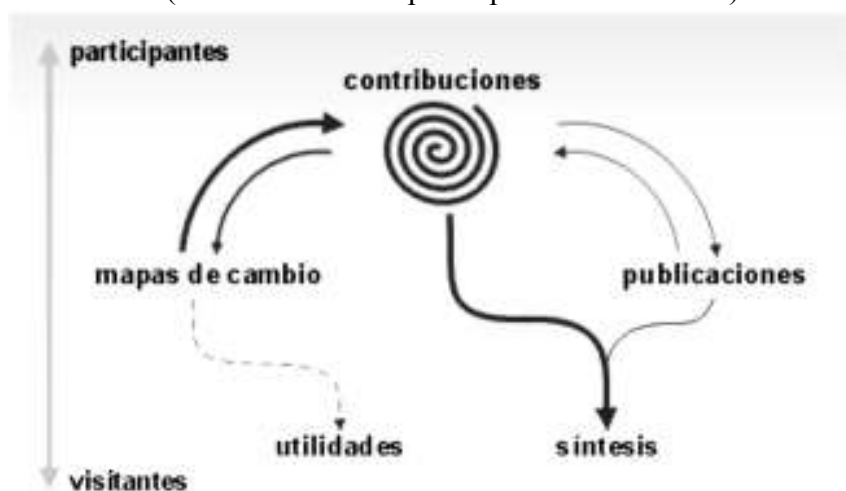
Mediante el análisis de series temporales de NDVI provenientes de los sensores NOAA-AVHRR, se identificaron “hotspots” que representarían cambios funcionales intensos (“mapas de cambio” en Figura 5). Se considera que estos mapas podrían constituir la base para discusiones acerca de los ecosistemas sudamericanos y para la prueba de las capacidades e inconvenientes de las series temporales de información (“contribuciones” en Figura 5). Por lo tanto, en función de guiar a los expertos en las contribuciones de las posibles causas de los cambios detectados, se le pide que: 1- exploren los mapas generados, 2- seleccionen un “hotspot” de cambio, 3- sugieran posibles causas de los cambios, mediante la

formulación de hipótesis o la presentación de evidencias con diferente grado de apoyo, y 4- presenten publicaciones relacionadas (“publicaciones” en Figura 5). Otro objetivo de esta iniciativa es facilitar el acceso a bases de datos de información satelital al público general en imágenes satelitales (“utilidades” en Figura 5). Toda la información se encontrará accesible para el público general sin ningún tipo de restricciones y absolutamente libre. Los diferentes participantes podrán generar sus propios meta-análisis o síntesis, pudiéndolas publicar con solo citar el origen de esta información (“síntesis” en Figura 5).

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado mediante un subsidio del Inter-American Institute for Global Change Research (IAI, CRN II 2031), que es apoyado por el US National Science Foundation (Grant GEO-0452325) y por el subsidio Sensor - TTC No. 003874.

Figura 5. Representación de los diferentes componentes de LechuSA, indicando el flujo de la información y el grado de compromiso de la comunidad científica (desde visitantes a participantes de los foros)



Referencias y bibliografía de apoyo

- BALDI, G., NOSETTO, M.D. et al. Long-term satellite NDVI datasets: Evaluating their ability to detect ecosystem functional changes in South America. *Sensors*, enviado.
- BRUTSAERT, W. Catchment-scale evaporation and atmospheric boundary layer. *Water Resources Research*, v. 22, p. 39-46, 1986.
- CVG PROFORCA Producción Forestal. Caracas.
- CHAVEZ, P.S., JR. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 55, p. 1285-1294, 1989.
- DIEA-MGAP 2003. La actividad forestal a través del censo agropecuario. Dirección de Estadísticas Agropecuarias - Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Montevideo.
- DUNCAN, M.J. Hydrological impacts of converting pasture and gorse to pine plantation, and forest harvesting, Nelson, New Zealand. *Journal of Hydrology New Zealand*, v. 34, p. 15-41, 1995.
- EASTMAN, R.J. IDRISI 32 Guide to GIS and Image Processing. Clark Labs, Worcester. 1999.
- ETTER, A., MCALPINE, C. et al. Unplanned land clearing of Colombian rainforests: Spreading like disease? *Landscape and Urban Planning*, v. 77, p. 240-254, 2006.
- FAO 2001. FAOSTAT homepage. Food and Agriculture Organization of the United Nations. -- 2005. Global Forest Resources Assessment. Roma.
- FARLEY, K.A., JOBBÁGY, E.G. et al. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology*, v. 11, p. 1565-1576, 2005.
- GRIER, C.C., LEE, K.M. et al. 1989. Productivity of forests of the United States and its relation to soil and site factors and management practices: a review. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-222. USDA, Portland.
- HYVÖNEN, R., A. OGREN, G.I. et al. The likely impact of elevated [CO₂], nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: A literature review. *New Phytologist*, v. 173, p. 463-480, 2007.
- INFOR Superficie de plantaciones forestales. Instituto Forestal, Santiago de Chile.
- JACKSON, R.D., REGINATO, R.J. et al. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, v. 13, p. 651-656, 1977.
- JOBBÁGY, E.G., y JACKSON, R.B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, v. 10, p. 423-436, 2000.
- _____. Patterns and mechanisms of soil acidification in the conversion of grasslands to forests. *Biogeochemistry*, v. 64, p. 205-229, 2003.
- _____. Groundwater use and salinization with grassland afforestation. *Global Change Biology*, v. 10, p. 1299-1312, 2004a.
- _____. Groundwater use and salinization with grassland afforestation. *Global Change Biology*, v. 10, p. 1299-1312, 2004b.

JOBBÁGY, E.G., SALA, O.E. et al. Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach. *Ecology*, v. 83, p. 307-319, 2002.

JOBBÁGY, E.G., VASALLO, M. et al. Forestación en pastizales: hacia una visión integral de sus oportunidades y costos ecológicos. *Agrociencias*, v. 10, p. 109 - 124, 2006.

KITZBERGER, T., STEINAKER, D.F. et al. Effects of climatic variability on facilitation of tree establishment in northern Patagonia. *Ecology*, v. 81, p. 1914-1924, 2000.

LEZAMA, A.T., DÍAZ, M. et al. Natural hazards assessment and management in caribbean pine plantations of eastern Venezuela. International Symposium The Economics of Natural Hazards in Forestry, pp. 19-30, Solsona. 2001.

LOS, S.O., COLLATZ, G.J. et al. A global 9-year biophysical land-surface data set from NOAA AVHRR data. *Journal of Hydrometeorology*, v. 1, p. 183-199, 2000.

NOSETTO, M.D., JOBBÁGY, E.G. et al. Land-use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology*, v. 11, p. 1101-1117, 2005.

_____. Carbon sequestration in semiarid rangelands: Comparison of *Pinus ponderosa* plantations and grazing exclusion in NW Patagonia. *Journal of Arid Environments*, v. 67, p. 142-156, 2006.

_____. The effects of tree establishment on water and salts dynamics in naturally salt-affected grasslands. *Oecologia*, v. 152, p. 695-705, 2007.

_____. Regional patterns and controls of ecosystem salinization with grassland afforestation along a rainfall gradient. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 22, GB2015, p. doi:10.1029/2007GB003000, 2008.

OLSON, D.M., DINERSTEIN, E. et al. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth. *Bioscience*, v. 51, p. 369-381, 2001.

QIN, Z., KARNIELI, A. et al. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, v. 22, p. 3719-3746, 2001.

SAGPYA 2001. Inventario Nacional de Plantaciones Forestales, Buenos Aires.

SELLERS, P.J. A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies. Part 2: the generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, v. 15, p. 3519-3545, 1994.

TUCKER, C.J., y SELLERS, P.J. Satellite remote sensing for primary production. *International Journal of Remote Sensing*, v. 7, p. 1395-1416, 1986.

WOLTER, K., y TIMLIN, M.S. Measuring the strength of ENSO events - how does 1997/98 rank? *Weather*, v. 53, p. 315-324, 1998.

ZALBA, S.M., y VILLAMIL, C.B. Woody plant invasion in relictual grasslands. *Biological Invasions*, v. 4, p. 55-72, 2002.