

## Aplicación de modelos no lineales en el estudio de la tasa de recuperación de la vegetación post disturbios de fuego para distintos ecosistemas de la Argentina

Boca, Teresa<sup>a</sup>; Mari, Nicolás<sup>a</sup>; Di Bella, Carlos<sup>a</sup>, Kanpandegi, Jon Ander<sup>ab</sup>

<sup>(a)</sup>Instituto de Clima y Agua, INTA Castelar

Los Reseros y las Cabañas s/n C/P 1712, Castelar, provincia de Buenos Aires, ARGENTINA

<sup>(b)</sup>Universidad de Alcalá,

Calle Colegios 2, 28801 Alcalá de Henares, ESPAÑA

tboa@cnia.inta.gov.ar, cdibella@cnia.inta.gov.ar, nmari@cnia.inta.gov.ar, jakanpan@gmail.com

### RESUMEN

Se ajustaron modelos no lineales logísticos, para modelar el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de sitios quemados. Se analizaron cuatro regiones: Espinal; Monte; Yungas y Chaco seco, para el periodo 2003-2006. Dos tipos de vegetación fueron analizados, arbustal abierto y arbustal cerrado. Los resultados muestran las diferencias entre las regiones y tipos de vegetación. La importancia del ajuste de estos modelos radica en la potencial capacidad de predicción de los tiempos y tasa de recuperación de distintos ecosistemas teniendo en cuenta la estacionalidad del crecimiento.

Palabras clave: Modelos no lineales, NDVI, Regeneración.

### ABSTRACT

No lineal logistic models were adjusted to model the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of burned sites. Four regions were analyzed: Espinal, Monte, Yungas and Chaco seco, through the period 2003-2006. Two vegetation types were analyzed inside of each region, close shrublands and open shrublands. The outcomes show the differences between the regions and the vegetation types. The importance of the adjustment in these models lies in the potential capacity of prediction of the period and recovery rate from these ecosystems, taking into account the seasonality of the population growth rate.

Keywords: No lineal model, NDVI, regeneration.

### Introducción

El fuego es un componente predominante en la región Centro-Norte de la Argentina, comúnmente utilizado como herramienta de manejo ganadero para la mejora de pasturas (Fig. 1), en prácticas de deforestación para el avance de la frontera agrícola y en ocasiones causado por negligencia en zonas de esparcimiento. Existen diversos estudios realizados que hacen referencia al efecto modelador del fuego sobre la estructura y fisonomía de la vegetación (Herrera, 2003) y así mismo a los efectos sobre la recuperación en el tiempo de distintos tipos de ve-

getación y sus niveles de cobertura (Bravo et al, 2003). En su mayoría las experiencias de estos estudios son realizadas a nivel de parcela o a partir de observaciones directas asociadas a un ecosistema en particular. Sin embargo, son escasos los estudios realizados a escalas regionales que abarquen distintos ecosistemas y tipos de vegetación simultáneamente.



**Figura 1.** Incendio provocado por productores agrícolas para la mejora de pasturas en ambientes de arbustales abiertos.

En este contexto la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son particularmente útiles, especialmente para la comprensión de fenómenos de naturaleza espacial y temporalmente dinámica, como es el caso de los procesos de regeneración post fuego (Díaz-Delgado *et al.*,2001).

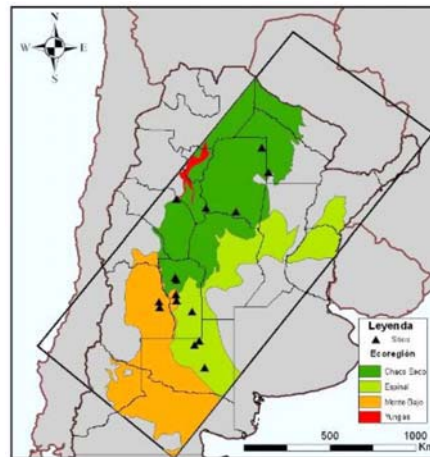
El objetivo de nuestro trabajo está orientado a modelar la dinámica de recuperación del verdor fotosintético de distintos tipos de vegetación y niveles de cobertura, inmersos en ambientes diferentes, utilizando el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Se parte de la hipótesis que la dinámica de regeneración está influenciada por las condiciones particulares de cada ambiente estudiado, en este caso representados por los distintos ecorregiones.

## Materiales y Métodos

### Área de estudio:

El trabajo se llevó a cabo sobre cuatro ecosistemas representados por las ecorregiones más típicas del centro-norte de la Argentina: el Chaco Seco, Yungas, Monte y Espinal (Cabrera, 1976) (Fig.2). El área comprende una gran variabilidad en cuanto a climas, tipos de vegetación, usos del suelo y regímenes de fuego. La región del Chaco seco en particular, concentra la mayor ocurrencia de incendios del país, estimándose un valor aproximado de 8500 Km<sup>2</sup> de quemadas anuales. Por su parte, las regiones de Monte y Espinal han sido históricamente y en la actualidad, escenario de grandes cambios en el uso del suelo, principalmente a partir de las actividades ganaderas (Soriano 1991) periféricas a la frontera pampeana. El fuego ha sido el principal agente de cambio utilizado en tal proceso, económicamente viable y accesible. Las cau-

sas por negligencia son más comunes en zonas más lejanas al cordón agrícola, penetrando en las zonas serranas y llanos del Chaco seco, donde se queman en su mayoría bosques nativos. En las Yungas, el fuego también es un componente importante de la fisonomía actual del paisaje, regulando la densidad de masas forestales subtropicales.



**Figura. 2:** Ecorregiones estudiadas. Los triángulos representan la localización de los fuegos analizados.

### Materiales:

Se utilizaron series temporales de NDVI obtenidas a partir del sensor MODIS (MOD13A1-V4). La identificación de los fuegos se llevó a cabo en base a la detección de focos de calor MODIS ([www.conae.gov.ar](http://www.conae.gov.ar)). Los datos de NDVI para cada sitio quemado, fueron extraídos para distintas coberturas de arbustales identificadas a partir del mapa de vegetación GLC2000 (Eva *et al.*,2004). La delimitación de las regiones ecológicas, se realizaron de acuerdo al mapa de Olson *et al*, 2001. En total se obtuvieron aproximadamente 10.000 observaciones con estas características a lo largo del período de estudio.

### Métodos

#### Análisis estadístico:

Para determinar el tiempo de duración post fuego de cada curva de crecimiento correspondiente a cada tipo de vegetación y eco-región, se realizó la comparación con un sitio de iguales características que no hubiese sido afectado por el fuego. El momento de corte de la serie se determinó en aquel punto en que no se en-

contraran diferencias significativas entre ambas series. De esta forma se intentó garantizar que el valor de NDVI final de cada curva representara el máximo potencial de cobertura verde de cada tipo de vegetación en cada región analizada. Este análisis fue implementado utilizando un test T de Student para cada situación.

Los valores de NDVI para las distintas regiones fueron ajustadas bajo un modelo no lineal de tipo modelo logístico en función del tiempo. Se utilizó este modelo ya que es el más común dentro de los modelos para las curvas de crecimiento y no supone crecimiento infinito como otros modelos no lineales. Además, los modelos no lineales poseen la ventaja de tener menos parámetros que los modelos polinómicos, los que los hace más parsimoniosos. Por otro lado proveen predicciones más confiables fuera del rango de observaciones (Pinheiro 2000). Para la estimación de los parámetros se procedió primeramente a la transformación de los valores de «y» (NDVI) según la ecuación (1)

$$z = \log\left[\frac{y}{1-y}\right] \quad (1)$$

Luego se aplicó la regresión lineal simple:

$$x = a + bz$$

Y utilizando  $x_{mid} = a$ ,  $scal = b$ , se ajustó el siguiente modelo no lineal logístico (2):

$$NDVI = \frac{Asym}{1 + e^{\left[\frac{momento - x_{mid}}{scal}\right]}} \quad (2)$$

Donde:

*Asym*= representa el valor asintótico, y estima el máximo alcanzado por la población, sus unidades están representadas en valores de NDVI (ver Figura 3).

*Xmid*= el tiempo hasta la mitad del valor de la asíntota (ver figura 3).

*Scal*=este parámetro da idea de la forma de la S de la curva, representa el intervalo hasta  $\frac{3}{4}$  de la asíntota, y se puede pensar que valores más chicos representan tasas de cambio mayores, cuando este valor es positivo, entonces el valor de *Asym* representa el valor horizontal asintótico cuando x (tiempo) tiende a  $\infty$ , y un valor 0 es la asíntota horizontal de x teniendo a (ver figura 3).

*Edad*: variable que representa el tiempo (meses desde la fecha del incendio).

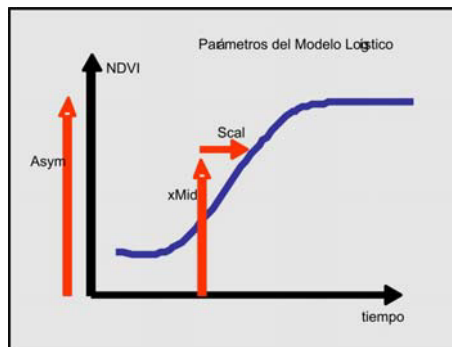


Figura 3. Interpretación gráfica de los parámetros del modelo logístico.

Este tipo de funciones son utilizadas en curvas que se suponen crecen gradualmente en las primeras etapas, más rápidamente en el periodo intermedio y lentamente al final, cuando alcanza el máximo valor. Lo cual es un comportamiento esperable para vegetación arbustiva (Viedma, *et al.* 1997). Para la estimación de los parámetros de la función logística para cada región y tipo de vegetación se utilizó el paquete estadístico *nlme* de R. (R, 2006). Se seleccionó el método de estimación por máxima verosimilitud, opción dentro de dicho paquete. Para cada valor estimado de los distintos parámetros se calculó el intervalo de confianza asintótico como medida de confiabilidad de las estimaciones (Tabla 1). Se asumió que:  $e_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$ , donde  $e_{ij}$  corresponde a los errores aleatorios del modelo asumido.

## Resultados

Como puede verse en la Tabla 1, no se encontraron diferencias en los valores asintóticos (*Asym*) que representan el máximo de *NDVI* alcanzado para cada tipo de vegetación en las regiones de Chaco y Espinal, dado que los valores de ambos tipos de vegetación son incluidos en el Intervalo de confianza de los respectivos tipos de vegetación.

En cambio si se encontraron diferencias entre los valores de Monte con Chaco y Espinal.

Las estimaciones para Yungas muestran un valor nominal más alto que para las otras regiones, pero los amplios límites que presentan el intervalo de confianza no nos permite afirmar que esta diferencia fuese significativa.

Para los valores de los otros dos parámetros, *xmid* y *scal*, que determinan la forma sigmoidea típica de la función, y por ende la tasa de cambio o crecimiento de los valores de *y* (*NDVI*) con respecto a *x* (tiempo) no se encontraron diferencias significativas.

Los distintos gráficos (Fig. 4 a Fig. 11) muestran los valores observados y los modelos ajustados para cada situación.

En las regiones de Chaco y Monte, los valores de *NDVI* están afectados por la tendencia estacional. Esta tendencia no fue tenida en cuenta en la modelización, ya que solo se evaluaba el tiempo como factor de ajuste. Para la eliminación de la tendencia, se aplicó un suavizado a los datos en función de medias móviles para los periodos especificados.

**Tabla 1** Estimación de parámetros

Valores estimados	ESPINAL		MONTE	
	C	A	C	A
<i>LI</i>	0.41	0.44	0.360	0.356
<i>Asym</i>	0.44	0.47	0.368	0.362
<i>LS</i>	0.47	0.50	0.376	0.367
<i>LI</i>	2.18	2.26	2.09	2.07
<i>xmid</i>	2.24	2.31	2.17	2.15
<i>LS</i>	2.30	2.35	2.26	2.22
<i>LI</i>	0.28	0.34	0.14	0.17
<i>scal</i>	0.41	0.42	0.21	0.22
<i>LS</i>	0.54	0.50	0.28	0.28

**Tabla 1** Estimación de parámetro (continuación)

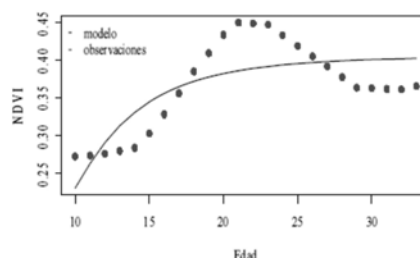
Valores estimados	YUNGAS		CHACO	
	C	A	C	A
<i>LI</i>	0.08	0.04	0.39	0.39
<i>Asym</i>	0.92	0.92	0.40	0.40
<i>LS</i>	1.77	1.88	0.42	0.41
<i>LI</i>	1.63	1.43	2.14	2.14
<i>xmid</i>	3.23	3.23	2.22	2.22
<i>LS</i>	4.83	5.03	2.30	2.30
<i>LI</i>	0.37	0.30	0.18	0.18
<i>scal</i>	0.89	0.89	0.28	0.26
<i>LS</i>	1.41	1.48	0.37	0.35

C: Arbustal cerrado; A: Arbustal abierto; *Asym*; *xmid*; *scal*: parámetros del modelo. *LI*; *LS*: Límite inferior y superior de los Intervalos de confianza para los parámetros respectivamente.

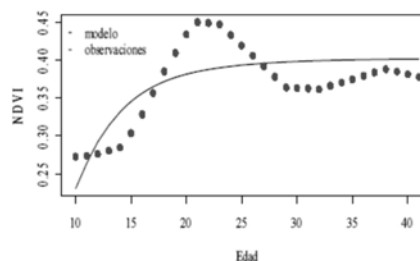
La Tabla 2 representa los criterios de selección de modelos no paramétricos AIC (Criterio de Información de Akaike) y BIC (Bayesian Information Criterion), para ambos criterios se deben seleccionar los modelos con valores más bajos. Como puede observarse, los modelos para las regiones de Yungas y Chaco son los más exactos (valores de AIC menores), siendo los modelos que menos se ajustan a los datos, los de arbustal abierto en el Espinal y Monte. Esto puede verse en los gráficos presentados a continuación (Fig. 4 a Fig. 11).

**Tabla 2** Criterios de jerarquización de los modelos

Región	Tipo de Veg	AIC	BIC
Espinal	A. abierto	1341.53	1303.06
	A. cerrado	575.92	545.62
Monte	A. abierto	1512.66	1472.04
	A. cerrado	824.34	789.28
Yungas	A. abierto	280.00	258.41
	A. cerrado	355.00	331.18
Chaco	A. abierto	467.61	439.09
	A. cerrado	432.50	404.63



**Fig.4:** Modelo para arbustal cerrado en Chaco



**Fig.5:** Modelo para arbustal abierto en Chaco.

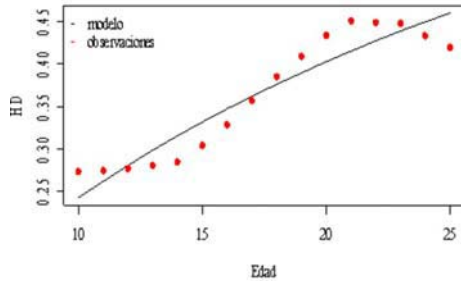


Fig.6: Modelo para arbustal cerrado en Yungas.

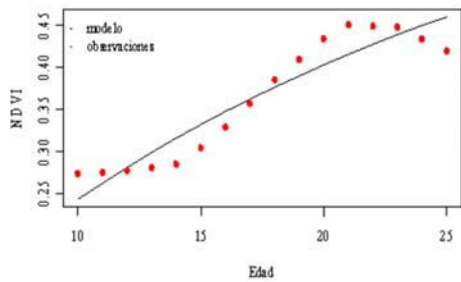


Fig.7: Modelo para arbustal abierto en Yungas.

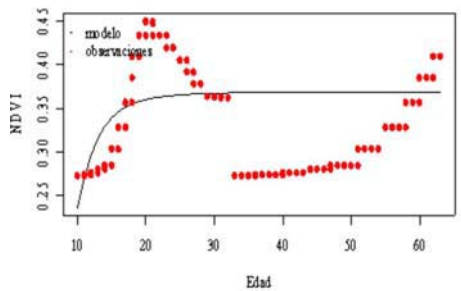


Fig.8: Modelo para arbustal cerrado en Monte.

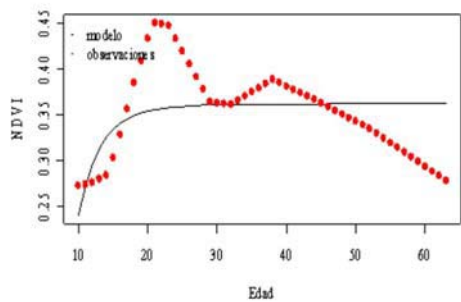


Fig.9: Modelo para arbustal abierto en Monte.

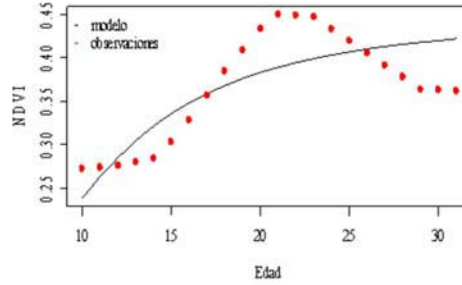


Fig.10: Modelo para arbustal cerrado en Espinal.

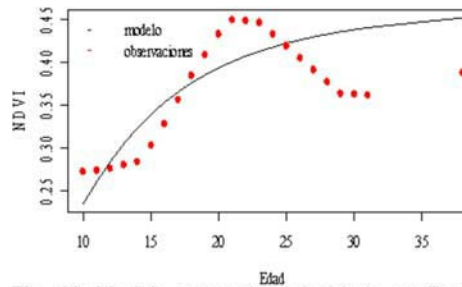


Fig.11: Modelo para arbustal abierto en Espinal.

### Conclusiones

La aplicación de modelos no lineales para estimar la dinámica de recuperación de la vegetación post fuego nos permitió determinar que la tasa de recuperación no mostró diferencias significativas en los distintas eco-regiones, lo que nos permite inducir que el efecto del fuego es independiente del tipo de vegetación y región analizada dentro de los grupos estudiados, en cambio si se detectaron diferencias en el valor final de NDVI alcanzado, utilizando como estimador del mismo el valor de  $Asym$  de cada modelo. Como puede verse en las figuras 4 y 5 vs Fig 6 y 7 los valores máximos no llegan a un *plateau* en el área de Yungas como en la zona del Chaco, para ambos tipos de vegetación. Esto podría evidenciar la dificultad que tienen ecosistemas como el de Yungas para recuperarse después del fuego.

Para las regiones Chaco y Yungas los modelos propuestos ajustaron mejor que para las restantes regiones, este se observa a través de sus menores valores de AIC y BIC.

Debe considerarse que no se cuenta con una serie de datos lo suficientemente larga como para poder eliminar la variabilidad estacional

natural de los datos, lo que se ve reflejado en los altos valores de AIC de algunos ajustes.

La estimación de los parámetros de modelos no lineales para predecir la recuperación fotosintética de la vegetación post fuego, es una herramienta útil, que nos permitirá conocer la dinámica de cada región, y determinar los tiempos de su recuperación. Es necesario entonces continuar con el registro de este fenómeno, para robustecer el ajuste de estos modelos. También se podrían proponer otros modelos no lineales, que no fueron utilizados en esta oportunidad, ya que sus parámetros no son de fácil interpretación biológica como el modelo logístico.

### Agradecimientos

Agradecemos la ayuda del Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) CRN-2031 apoyado por la US National Science Foundation (Grant GEO-0452325).

Este trabajo fue financiado por INTA en el marco de los proyectos DERN 4 Y AERN4642. Se agradece a CONAE por el suministro de información de focos de calor.

Los datos MODIS utilizados en este trabajo son distribuidos por el «Land Processes Distributed Active Archive Center» (LP DAAC), ubicado en el U.S. Geological Survey (USGS) Center for Earth Resources Observation and Science (EROS) <http://LPDAAC.usgs.gov>.

Así mismo se agradece la colaboración de María de los Ángeles Fischer y Francisco Ferrer por su aporte en el procesamiento de datos.

### Referencias

A. Soriano; R J. León; D. E. Sala; R. S. Lauado; V.A. Deregibus; M.A. Cahuepe. O.A Scaglia; .C.A. Velazquez and J.H Lemcoff. 1991 «Rio de la Plata grasslands» Ecosystems of the World: Natural grasslands. Introduction and

Western Hemisphere (Amsterdam: Elsevier) pp367-407

Cabrera ÁL (1976) Regiones fitogeográficas argentinas. En Kugler WF (Ed.) *Enciclopedia argentina de agricultura y jardinería*. Tomo 2. 2a edición. Acme. Buenos Aires. Argentina. Fascículo 1. pp. 1-85.

Díaz-Delgado R., Lloret F., and Pons X.2001. Influence of fire severity on plant regeneration by means of remote sensing imagery. *International journal of Remote Sensing*, Vol. 24, No.8, 1751-1763.

Eva, H.D., Belward, A.S., De Miranda, E.E., Di Bella, C.M., Gond, V., Huber, O., Jones, S., Sgrenzaroli, M., Fritz, S. 2004. A land cover map of South America. *Global Change Biology*.10, 1-14, Blackwell Publishing Ltd.

José C. Pinheiro and Douglas M. Bates (2000), *Mixed-Effects Models in S and S-PLUS*, Statistics and Computing Series, Springer-Verlag, New York, NY.

Kunst CR, Bravo S, Panigatti JL.2003. Fuego en los ecosistemas Argentinos. INTA. Santiago del Estero. Caps. 6 y 13.

Olson, D., Dinerstein, E., Wikramanayake, E., Burgess, N., Powell, G., Underwood, E., D'Amico, J., Itoua, I., Strand, H., Morrison, J., Loucks, C., Allnut, T., Ricketts, T. Hura, Y., Lamoreux, J., Wettengel, W., Hedao, P., Kassem, K. 2001. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. *BioScience*. Vol. 51 No. 11.

R Development Core Team (2006). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.

Viedma, O., Meliá, J., Segarra, D. y García-Haro, J. 1997. Modeling rates of ecosystem recovery after fires by using Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment* 61: 383-398.