

Título Proyecto: **Indicadores de degradación de bosques basados en el análisis de series temporales de datos satelitales ópticos, térmicos y de microondas: hacia un modelo de alerta temprana para la región de Chaco seco.**

INTRODUCCIÓN

El proyecto se basa en el desarrollo de una metodología para generar herramientas para el monitoreo de degradación de bosques en la ecoregión del Chaco Seco, a partir de series temporales de datos satelitales multisensor. Los mapas tendrían una frecuencia temporal semanal, por lo que el producto podría utilizarse como una alerta temprana de degradación.

El trabajo se enmarca en la problemática descrita en el **EJE DE TRABAJO 3** – “*Monitoreo de los recursos forestales nativos*”, en particular en

“1. Desarrollo de metodologías automatizadas para el monitoreo de bosques nativos incluyendo procesos de cambio de la cobertura del suelo, a partir de tecnologías de geomática multisensor a escala provincial, regional y nacional.

2. Desarrollo de metodologías para definir distintos niveles de degradación del bosque nativo, e identificar y monitorear dicho proceso a partir de tecnologías basadas en geomática.”

OBJETIVO CENTRAL

El objetivo general de este proyecto es la generación de un producto satelital operativo de alerta temprana (un mes) de degradación de bosques a escala regional mediante el análisis de series temporales de datos satelitales multisensor. La hipótesis planteada es que métodos complejos de extracción de información que operan sobre series temporales de productos basados en datos de microondas pasivas, ópticos y térmicos son capaces de monitorear distintos niveles de degradación a escala regional. Sólo el análisis de la totalidad de las series de tiempo disponibles, que por su longitud incluyen los efectos de los forzantes climáticos típicos del área, podría separar los efectos climáticos de los antrópicos. De esta manera, en función de las distintas características biogeofísicas de cada ecosistema dentro del área de estudio, se podrían identificar áreas sometidas a procesos de degradación. El producto tendría una resolución espacial de 25 x 25 Km y una frecuencia temporal de 8 días.

OBJETIVOS ESPECIFICOS E HIPOTESIS DE TRABAJO

La hipótesis central de este proyecto es que al combinar información satelital multisensor y multitemporal se puede identificar zonas degradadas a nivel regional. En este marco, las preguntas claves de este proyecto son:

- **Q1:** ¿Cuáles son los patrones espaciotemporales típicos (bosque no degradado) de los distintos productos satelitales (microondas pasivas, ópticos y térmicos) en las distintas zonas del área de estudio?
- **Q2:** ¿Cuáles son los patrones espaciotemporales de las zonas de bosque degradadas de cada uno de los productos satelitales en las distintas zonas del área de estudio?
- **Q3:** ¿Con que error es posible diferenciar los distintos procesos de degradación (deforestación, tala selectiva, otros) utilizando la metodología propuesta en las distintas zonas de la ecoregión del Chaco Seco?

En este contexto, el desarrollo del proyecto depende de la validez de las siguientes hipótesis,

- **H1:** El índice de vegetación mejorado (Enhanced Vegetation Index, EVI) brinda información cuantitativa con respecto al índice de área foliar (Leaf Area Index, LAI) en primer orden y al contenido de clorofila en segundo orden, y existen modelos para estimar estos parámetros a partir del EVI. Estas son suposiciones razonables y están ampliamente avaladas por trabajos previos de este grupo y por la literatura [Barraza *et al*, 2013a; Huete *et al*, 1999].

- **H2:** El espesor óptico de la vegetación (*Vegetation Optical Depth*, VOD) brinda información cuantitativa con respecto al contenido de agua del dosel (*Canopy Water Content*, CWC) en primer orden y al LAI en segundo orden, y existen modelos para estimar estos parámetros a partir del VOD. Estas suposiciones son también razonables y están también avaladas por trabajos previos de este grupo y por la literatura [Andela et al., 2013; Barraza et al., 2014a].
- **H3:** La temperatura brillo (T_b) medida en el infrarrojo es proporcional a la temperatura termodinámica (T) de la vegetación, y la constante de proporcionalidad es más o menos constante a lo largo de año.
- **H4:** El análisis de las series de tiempo de EVI, VOD y T_b permitirá extraer información cuantitativa del estado de la vegetación de la zona de estudio, medida en términos de perturbaciones con respecto a la dinámica normal de los indicadores seleccionados (LAI, CWC y T).
- **H5:** El análisis de las fluctuaciones observadas en términos de LAI, CWC y T permitirá identificar distintos tipos de disturbios, entre ellos disturbios climáticos, inundaciones, sequías y degradación de la vegetación.

Para evaluar estas hipótesis, se plantea un estudio multitemporal y multisensor a distintas escalas espaciales (25 km, 500 m y 30 m), aprovechando las ventajas que cada sistema de observación ofrece. En particular, la metodología se basa en:

1. el análisis de series temporales combinando la información provista por los productos de microondas pasivas y ópticos a una escala de 25 Km;
2. un análisis detallado en sitios clave utilizando información satelital óptica de alta resolución para validar distintos escenarios claves de degradación de bosque detectados mediante las metodologías mencionadas en el punto 1.

Por tanto, proponemos desarrollar productos para el monitoreo de degradación de bosques a escala regional y con resolución temporal semanal, proporcionar los algoritmos desarrollados y difundir el producto final para que sea utilizado como insumo para tareas de ordenamiento territorial, optimización de actividades de inventario y evaluación de riesgo ambiental, entre otras.

Del objetivo principal y las preguntas clave se desprenden los siguientes objetivos específicos:

1. Evaluar la potencialidad de las series temporales de productos de sistemas satelitales (microondas, ópticos y térmicos), para monitorear distintas condiciones de degradación utilizando además modelos de interacción y datos de campo históricos.
2. Desarrollar una metodología que permita extraer métricas fenológicas típicas del área de estudio a escala regional utilizando la información satelital disponible.
3. Desarrollar una metodología que permita obtener información sobre tendencias interanuales y puntos de quiebre a escala regional a partir de la información satelital disponible.
4. Implementar un modelo de alerta temprana de degradación a escala regional, a partir de la detección de puntos de quiebre en las series de tiempo de los productos satelitales disponibles.
5. Evaluar la precisión y exactitud del modelo en la determinación de los distintos niveles de degradación a partir de datos in situ y un esquema anidado usando imágenes de alta resolución (validación).
6. Demostrar la capacidad del modelo para reproducir los cambios regionales ya observados, y la posibilidad de cuantificar la evolución espaciotemporal de áreas degradadas a nivel regional.
7. Divulgar el producto implementado de degradación/deforestación para su utilización por terceros interesados. Como el objetivo central del proyecto es la generación de un sistema operativo de alerta temprana, se incluirán auditorías periódicas de expertos durante el desarrollo del producto y capacitación y transferencia a usuarios e instituciones interesadas.

Relevancia del problema

La teledetección es una importante fuente de información para el seguimiento de los cambios de la cubierta forestal, tanto en términos de su eliminación total (deforestación), como para la determinación del cambio de estructura, bienes y servicios de los ecosistemas forestales que dan lugar a la degradación de los bosques. El monitoreo del cambio de uso del suelo es clave para hacer frente a las problemáticas ambientales tanto a nivel científico como a nivel aplicado, en especial en relación a sus efectos sobre el ciclo global del carbono, ciclo de agua, conservación de la biodiversidad y la gestión sostenible de los bosques, entre otros. Particularmente, la evaluación y el monitoreo de las condiciones de degradación de los bosques junto con la posibilidad de generar productos de información regionales disponibles de manera continua sobre esta temática, facilita la toma de decisiones al momento de planificar acciones en el territorio. Asimismo contribuyen a guiar investigaciones y procesos sociales que ayuden a proteger el ambiente y promuevan el manejo sustentable de las tierras.

En febrero de 1997, el Panel Intergubernamental sobre Bosques (IPF) de la Comisión de Desarrollo Sostenible (CDS) definió el programa forestal mundial. Reafirmó que la conservación y desarrollo sostenible de los bosques son asuntos de interés internacional. A nivel local, a finales de 2007 el Congreso Argentino aprobó la Ley 26.331 de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de los Bosques Nativos, más conocida como Ley de Bosques, reglamentada en febrero de 2009. Esta ley establece normas y también recursos económicos para el manejo sostenible de los bosques nativos y los servicios ambientales que éstos brindan a la sociedad. La Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal (UMSEF) dependiente de la Dirección de Bosques de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (SAyDS) tiene por misión el monitoreo de los bosques nativos, para la detección, cuantificación y seguimiento a lo largo del tiempo de procesos de origen natural y/o antrópico que modifiquen la estructura y/o extensión de los ecosistemas forestales naturales. La UMSEF utiliza principalmente técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica para el monitoreo de cambios en los bosques nativos. Estas técnicas se basan principalmente en interpretación visual de imágenes satelitales Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM y Landsat 8, lo que conlleva altos tiempos de procesamiento y la participación intensiva y coordinada (criterios ajustados en la evaluación visual para evitar resultados divergentes) de recursos humanos.

Si bien, el monitoreo del cambio de la cubierta forestal por lo general requiere información de alta resolución, estos conjuntos de datos tienen como limitaciones principales: (i) la existencia de períodos con datos faltantes debido a la baja frecuencia temporal y la posibilidad de presencia de cobertura nubosa durante la adquisición y, en algunos casos, (ii) los altos costos de adquisición cuando es necesario reemplazar imágenes de libre disponibilidad por otras pagas. Un enfoque alternativo y también complementario consiste en utilizar datos de menor resolución espacial, como los del *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) y/o el *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), ambos de distribución gratuita. La limitación obvia de estos enfoques es la incapacidad para medir el cambio a escala fina. Sin embargo, las bandas con una resolución espacial de 250 m en el sistema MODIS, se desarrollaron para detectar eventos significativos de cambio de cobertura de suelo [Townshend y Justice, 1988] y mejoran substancialmente datos existentes de resolución gruesa. Si bien la utilización de enfoques basados en datos ópticos de menor resolución constituyen un aporte muy importante, estos sistemas presentan algunas desventajas: (1) una baja resolución temporal, (2) cobertura nubosa y 3) necesidad de corrección atmosférica. Dichas limitaciones dan lugar a representaciones incompletas del terreno debido a la falta del dato o la exclusión de regiones enteras. A su vez, otra de las limitaciones de estos sistemas es la dificultad para identificar áreas afectadas por tala selectiva. Esto se debe a que las metodologías basadas únicamente en los índices ópticos (como el índice de vegetación normalizado (NDVI) o EVI), presentan deficiencias importantes para distinguir entre los bosques que han sido sometidos a diferentes intensidades de tala, lo que es atribuido principalmente a problemas de saturación e insensibilidad de los índices [Sader et al., 1989; Basuki et al., 2012]. Un resumen de los sistemas que operan en el óptico y sus características se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1 Utilidad de los sensores ópticos para el monitoreo de la deforestación/degradación a distintas escalas espaciales

Resolución espacial	Ejemplo de sistemas	Utilidad para el monitoreo	Costo
Muy alta (<5 m)	IKONOS, QuickBird, Worldview	Validación sobre áreas pequeñas para productos de mayor resolución	Muy Alto
Alta (10–60 m)	Landsat, SPOT HRV, AWiFs LISS III, CBERS	Principal herramienta para identificar la deforestación	Baja/media (histórica) a media/alta (actualidad)
Media (250–1000 m)	MODIS, SPOT Vegetation	Permite un seguimiento anual regional o global coherente para identificar grandes claros (> 10 a 20 ha) y localizar "puntos calientes" para su posterior análisis con alta resolución	Bajo o gratis

Con el fin de generar herramientas sinérgicas que permitan superar las limitaciones mencionadas anteriormente, varios autores [Jones et al., 2012; Andela et al., 2013; Liu et al., 2013; Barraza et al., 2014a] entre otros propusieron nuevas metodologías desarrolladas a partir de datos de microondas pasivas. Estos datos, aunque están caracterizados por una baja resolución espacial (~ 25 x 25 Km), presentan varias ventajas: (1) gran sensibilidad al contenido de agua de la vegetación, (2) alta revisita temporal (1-3 días), (3) baja sensibilidad a las condiciones atmosféricas y (4) alta sensibilidad a la estructura y contenido de agua de la vegetación (hojas, ramas y troncos según longitud de onda y la polarización). Por lo tanto, cuando se combina información de ambos sistemas (microondas pasivas y ópticos) las desventajas de ambos enfoques pueden ser reducidas. Esto se debe a que los índices ópticos proveen información relacionada con el verdor de la vegetación, complementaria a la información provista por los productos de microondas pasivas vinculada a la estructura y contenido de agua de la vegetación.

En este marco, se evidencia la importancia de los productos propuestos, los cuales proporcionarían un registro coherente del cambio de la cubierta forestal a nivel regional para el área de parque chaqueño. En primer lugar, los productos serán de importancia para la conservación y manejo de los recursos naturales a escala regional, pudiendo utilizarse como un monitoreo de alerta temprana. En segundo lugar, será de utilidad para comprender mejor el papel de los bosques y sus cambios en el sistema terrestre, y será de especial valor para diversas aplicaciones de modelado (particularmente las relativas a la modelización regional del ciclo de carbono [Ojima et al., 1994; DeFries et al., 1999] y la modelización hidrológica a escala regional [Sahin and Hall, 1996; Bounoua et al., 2002]).

En resumen, esta propuesta incluye el desarrollo de un método innovador basado en el análisis complementario de series de tiempo de datos ópticos, térmicos y en microondas pasivas. Brindará información regional, factible de ser evaluada a escalas más finas agregando información ya contemplada en la metodología (método anidado). Esto producirá un impacto a nivel del conocimiento de la región y también a nivel temático (aprovechamiento de datos satelitales), siendo esto último también de importancia por las inversiones del país en el desarrollo de misiones satelitales.

RESULTADOS PRELIMINARES Y APORTES DEL GRUPO AL ESTUDIO DEL PROBLEMA EN CUESTIÓN

El grupo de teledetección cuantitativa está integrado por cinco investigadores de CONICET (tres físicos y dos biólogas), tres doctorandos (ingeniería electrónica, biología y matemática), un post-doctorando (física) y un profesional en las ciencias de la computación. Desde inicios del 2000 mantenemos una estrecha colaboración con profesionales de la UMSEF y una de las integrantes del grupo (Haydee Karszenbaum) ha participado en las actividades de inventario forestal, en el

aprovechamiento de datos satelitales de la misión SAC-C argentina para Parque Chaqueño [SAyDS-UMSEF, 2007]. También hemos tenido colaboraciones con Ignacio Gasparri en la generación de mapas de biomasa de Chaco Seco [Gasparri and Baldi, 2013] y entre 2011 y 2013 hemos tenido una actividad de transferencia con UMSEF en el pre-procesamiento de imágenes ópticas (Resolución CONICET 3321/11). Asimismo el grupo colabora de manera sostenida con la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) en distintas misiones satelitales (SAC-D, SAOCOM, SABIAMAR). Además, el grupo presenta colaboraciones internacionales con diversos investigadores tanto en temáticas ambientales como metodológicas: Paolo Ferrazzoli (Tor Vergata, Roma), Alfredo Huete (University of Technology, Australia), Dara Entekhabi (MIT, USA), Tom Jackson (USDA, USA) y Wade Crow (USDA, USA) entre otros.

Este proyecto tiene como objetivo el análisis de series temporales de datos satelitales (ópticos, microondas pasivas y térmicos) para la generación de un producto operativo de degradación de bosques a escala regional. Varios trabajos han sido publicados en revistas internacionales con referato en relación al análisis de series temporales de datos ópticos, microondas pasivas y térmicos [Ferrazzoli et al, 2009, Salvia et al, 2011, Grings et al 2012, Barraza et al, 2013]. En particular, para la ecoregión del Chaco Seco hemos adquirido experiencia en el análisis de series temporales de datos satelitales tanto de datos ópticos [Barraza et al., 2013a] como de microondas pasivas [Barraza et al., 2014a, 2014b]. Se ha modelado la serie temporal del índice de vegetación normalizado (NDVI) del sistema MODIS para el área de la cuenca del Río Bermejo [Barraza et al., 2013b] correspondiente al período 2000-2010. Estos resultados se basaron en un análisis de las propiedades estructurales de las series temporales del NDVI [Barraza et al., 2013b] identificando distintos patrones funcionales dados por los parámetros que definen la curva (inicio de la temporada de crecimiento, pendiente y concavidad). En función de los parámetros del modelo, se identificaron patrones fenológicos estacionales de NDVI que representaron el comportamiento anual de ~ 90% del área. Entre los resultados obtenidos, se identificaron sitios donde se evidencia el avance de la frontera agrícola [Barraza et al., 2013b].

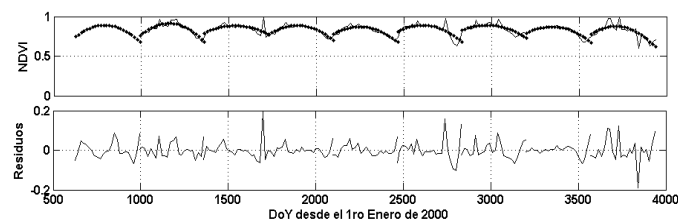


Figura 1. Ejemplo del ajuste del modelo dinámico (arriba) y residuo (abajo) para una serie temporal de NDVI perteneciente a la región chaqueña.

Más recientemente, hemos presentado un trabajo preliminar en el congreso internacional IGARSS 2015 [Barraza *et al.*, 2015] donde se analizan series temporales del espesor óptico de la vegetación (VOD, por sus siglas en ingles) de sistemas en microondas pasivas y del índice de vegetación mejorado (EVI, por sus siglas en ingles) del sistema MODIS con el objetivo principal de identificar áreas potenciales para el análisis de degradación. Hemos implementado un modelo aditivo basado en el modelo **Bfast** [Verbesselt *et al.*, 2010] para separar el componente estacional de la tendencia de series temporales para toda la ecoregión del Chaco Seco de las series temporales de VOD y EVI (ver ejemplo en la Figura 2).

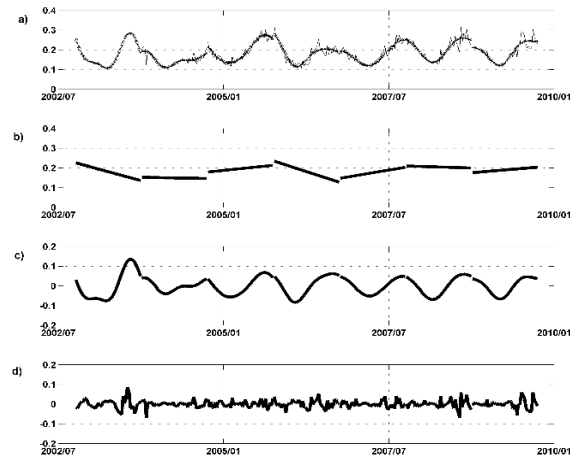


Figura 2 Ejemplo de la descomposición de la serie temporal de VOD del sistema LPRM-AMSR-E (a, línea sólida). El modelo dinámico (a, línea punteada) consiste de una tendencia anual (b), componentes estacionales (c) y residuos (d).

En las Figura 3 y 4 se muestran patrones espaciotemporales de los valores medios del componente estacional de VOD y EVI para el área del Chaco Seco durante el período 2002-2010. Se evidencia un gradiente de los valores medios anuales de VOD y EVI de norte a sur, presentando los valores mayores en latitudes cercanas a 25 ° S. En la Figura 5 se muestra el valor medio de la tendencia anual de VOD durante el período 2002-2010 para la misma área, encontrando también un gradiente espacial de dicha variable y variaciones temporales. Todos estos resultados en conjunto, evidencian la potencialidad del análisis de series temporales de datos ópticos y de microondas pasivas para desarrollar herramientas para el monitoreo de degradación/deforestación en áreas boscosas.

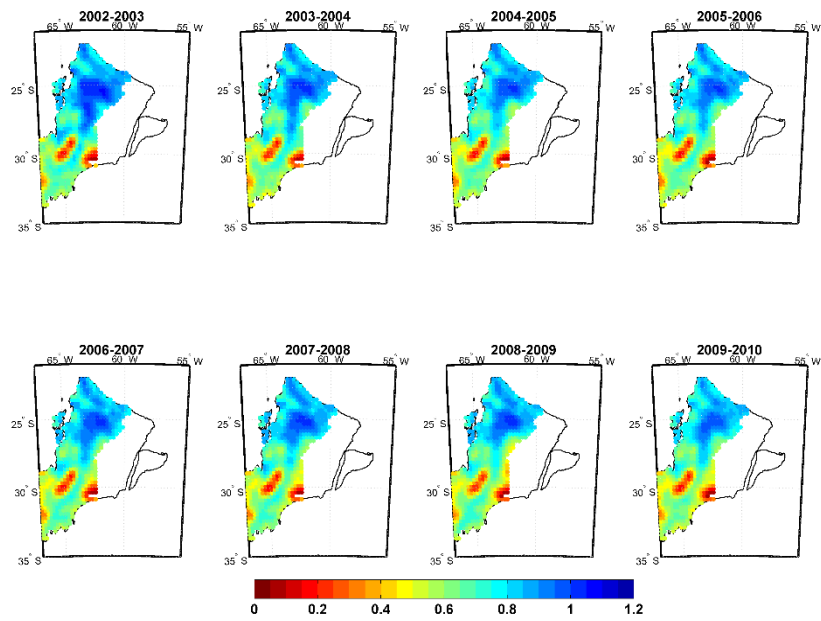


Figura 3. Mapas de valores medios anuales de VOD derivados de las series temporales de AMSR-E/LPRM (ver glosario) para la ecoregión del Chaco Seco.

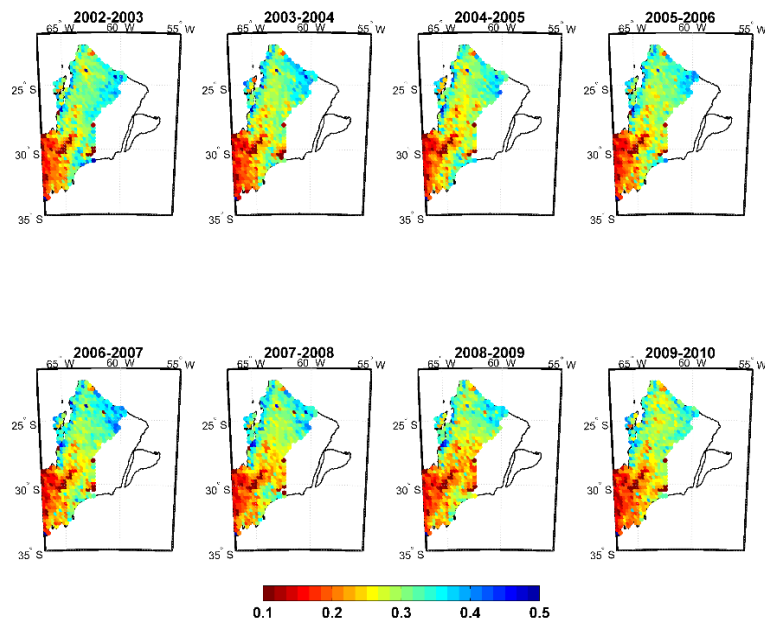


Figura 4. Mapas de valores medios anuales de EVI derivados de las series temporales de MODIS para la ecoregión del Chaco Seco.

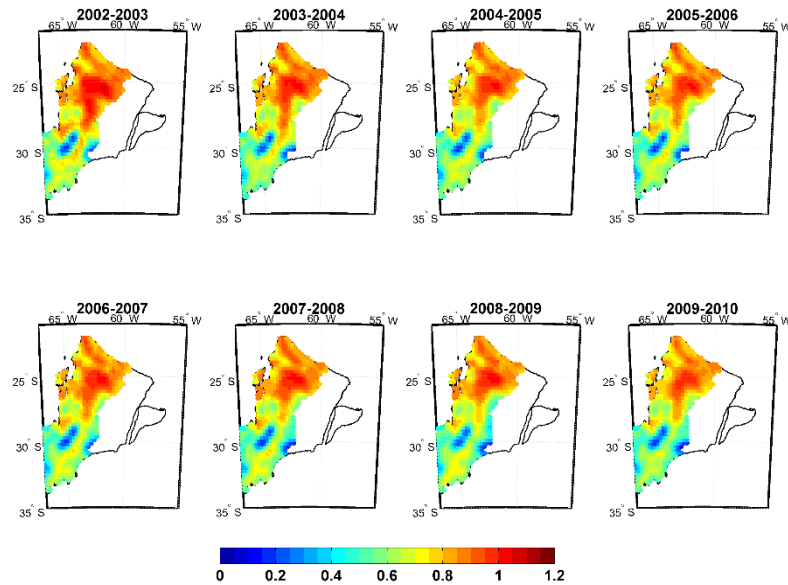


Figura 5. Mapas de tendencias medias anuales de VOD derivadas de las series temporales de AMSR-E/LPRM para la ecoregión de chaco seco.

METODOLOGÍA

1. Área de estudio

La región chaqueña es la segunda área boscosa en Sudamérica luego del Amazonas. En total esta región cubre una superficie de 108 millones de ha, incluyendo algunas de las áreas continuas de bosques secos más grandes del continente. La mayor parte de la superficie de la región se encuentra en Argentina, donde cubre 65 millones de ha lo que representa el 60 % de la superficie total. Burkart et al. (1999) diferencia dos ecoregiones correspondientes a la región chaqueña: el Chaco Seco y el Chaco Húmedo. El Chaco Seco cubre 78 millones de ha de las cuales el 50% (~39 millones de ha) se encuentra en Argentina.

La ecoregión del Chaco Seco argentino fue seleccionada como área de estudio porque incluye el área continua de bosque más extensa de Argentina (Figura 6), con sitios valiosos para la conservación y también sectores con procesos activos de deforestación en diferente grado de desarrollo. Los frentes de deforestación más antiguos están localizados en el noreste de Tucumán y el oeste de la provincia del Chaco; los más activos en el este de Salta; y los frentes más nuevos en el oeste de Formosa y norte de Santiago del Estero [Gasparri et al., 2010].

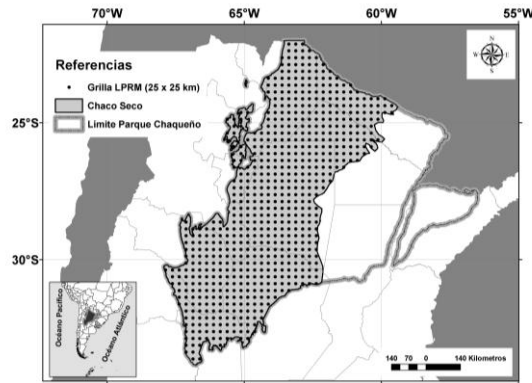


Figura 6. Área de estudio: el Chaco Seco en Argentina y el límite del Parque Chaqueño. Se indican los centros de los píxeles de 25 x 25 Km del producto VOD de LPRM-AMSR-E, seleccionados como la resolución base del producto propuesto.

2. Set de datos

El producto final se desarrollara utilizando los siguientes productos satelitales:

1. Vegetation Optical Depth (VOD) de los sistemas de microondas pasivas *Advanced Microwave Scanning Radiometer - EOS* (LPRM-AMSR-E), *Advanced Microwave Scanning Radiometer 2* (LPRM-AMSR-2), *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS), *Soil Moisture Active Passive* (SMAP) para los períodos 2002-2011, 2012-en adelante, 2011-en adelante, 2016-en adelante respectivamente.
2. *Enhanced Vegetation Index* (EVI) del sistema *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) para el período correspondiente desde 2002 - en adelante.
3. El producto *Land Surface Temperature (LST) and Emissivity 8-Day L3 Global 1 Km* (MOD11A2) y el producto de anomalías térmicas e incendios con una resolución espacial de 1 Km y con un período de composición de 8 días (MYD14A2) durante el período 2002 -en adelante. Los datos son obtenidos de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) <http://reverb.echo.nasa.gov/>.

Las observaciones en el rango del óptico se obtienen a partir de del producto MODIS de reflectancia de superficie a 500 m de resolución espacial con período de composición de 8 días (MYD09A1). A partir de este producto se calcula el índice de vegetación mejorado (EVI). Utilizando la información proveniente en las bandas de calidad (QA) de ambos productos de MODIS (MYD09A1, reflectancia, y MOD11A2, LST), se filtran datos de baja y mala calidad, y con presencia parcial o completa de nubosidad. Con el objetivo de hacer las series temporales homogéneas a nivel espacial, los productos EVI y LST se agregarán a la misma escala espacial que los datos de microondas pasivas (25 km x 25 km). En el mismo sentido, para homogeneizar las series a nivel temporal, las series temporales de VOD son agregadas al período de composición de MODIS, 8 días (la resolución temporal de los sistemas de microondas pasivas es de ~1-3 días).

3. Monitoreo de degradación

3.1. Series de tiempo – marco conceptual

Una serie de tiempo es una secuencia de observaciones satelitales de una región dada ordenadas cronológicamente. En teledetección, se habla de serie de tiempo cuando existe un conjunto de observaciones satelitales d provenientes del mismo sensor sobre la misma área,

$$\bar{d} = d_1 \dots d_N \quad (1)$$

El análisis de series de tiempo implica la extracción de información a partir del conjunto completo de datos d , en contraposición con análisis puntuales de un dato d_i en un tiempo dado (estimación tipo *snapshot*¹) o dos fechas d_i y d_j únicamente (detección de cambios típica). En el caso de monitoreo de vegetación utilizando series de tiempo, es esperable encontrar una periodicidad base asociada al ciclo fenológico anual. Sin embargo, también es esperable observar variaciones intra e interanuales.

Modelado de series de tiempo periódicas

Una serie de tiempo dada puede modelarse como:

$$\bar{d} = f(\bar{t}, \bar{\theta}) + \bar{e} \quad (2)$$

Donde $f(t, \theta)$ es un modelo dinámico de la serie y e es ruido aditivo (vinculado principalmente a incertezas asociadas al instrumento de medición, a la estimación del parámetro biofísico y al método de agregación para generar el producto). El modelo dinámico depende del tiempo t (como su nombre lo indica) y de los parámetros θ , que modelan las características de la serie de tiempo del producto estudiado (EVI, VOD, etc.) para el pixel en cuestión.

Suponiendo que se conoce el modelo dinámico para un $f(t, \theta)$ y se conoce el vector de parámetros θ con un error $\Delta\theta$ para un pixel dado, una perturbación en la serie de tiempo d se define como un cambio en alguno de los parámetros del θ estimado que presente un incremento mayor a $\Delta\theta$. Por ejemplo, si se sabe que el modelo dinámico es armónico ($d = \text{sen}(2\pi t/T) + e$) y se conoce el parámetro $T = (12 \pm 0.5)$ meses, una alteración es una fluctuación de T mayor a 0.5 meses. En principio, una perturbación pueden ser puntual (en la cual la serie presenta un único valor anómalo) o un cambio estructural (en el cual la serie presenta un cambio brusco o gradual, pero que modifica de manera definitiva los parámetros del modelo dinámico).

Ajuste del modelo dinámico – identificación del periodo histórico “no disturbado”

En un enfoque operativo, el primer punto es siempre determinar el modelo dinámico $f(t, \theta)$. En series de tiempo largas, es a veces posible suponer que los disturbios comenzaron después de un tiempo t_0 . Si esto es así, el periodo comprendido entre t_{inicial} y t_0 , $t_{\text{inicial}} < t < t_0$, se considera como “normal” y puede utilizarse para ajustar el modelo $f(t, \theta)$, determinando el vector θ en condiciones normales. Sin embargo, excepto en muy contados casos, en teledetección se dispone de series relativamente cortas, ya que los sistemas satelitales generan datos de manera sistemática desde hace 30 años aproximadamente. Entonces, el desarrollo y ajuste del modelo dinámico debe realizarse utilizando una estrategia alternativa.

En este proyecto, proponemos ajustar el modelo dinámico típico de un área dada utilizando pixeles correspondientes a “**zonas no disturbadas**”, definidos como pixeles que a la fecha no han sufrido cambios en la cobertura. Estos pixeles se seleccionaran utilizando datos históricos (imágenes ópticas de alta resolución y trabajo de campo), e incluirán un porcentaje de bosque nativo mayor al 95% en la actualidad. Es esperable que pixeles con este criterio presenten comportamientos dinámicos diferentes en las distintas zonas del Chaco Seco, dependiendo de los forzantes climáticos presentes y las características de la cobertura boscosa. Sin embargo, sin importar la zona específica, estos pixeles deberían presentar en principio una dinámica asociada únicamente a dos factores: (1) el **ciclo fenológico típico** del ecosistema y (2) **disturbios climáticos** (anomalías de precipitación y temperatura a primer orden). El ajuste de los parámetros del modelo en la condición “normal”, permitirá tanto caracterizar la dinámica “natural” como la respuesta del sistema ante forzantes climáticos típicos del área. En este punto es necesario hacer dos salvedades. Primero, debido a que la escala de trabajo es gruesa (25 x 25 Km), el ciclo fenológico no dependerá de una especie dada, sino que será el correspondiente al de la vegetación dominante en el área. Segundo, las forzantes climáticas capaces de afectar el ciclo fenológico a esta escala son de una intensidad y cobertura espacial tal que permite su identificación y evaluación.

¹ estimación utilizando una única imagen en una fecha dada

Una vez identificados los pixeles “normales” y estimado su vector de parámetros θ , se adoptara este modelo como el **modelo “no disturbado”** para la zonificación en cuestión. Llegado a este punto, existe para cada pixel de la imagen una serie de tiempo de observaciones satelitales medidas, y un modelo dinámico que reproduce la dinámica de los pixeles “no disturbados” de esa zonificación.

Detección de perturbaciones

La mayoría de los enfoques para analizar series de tiempo satelitales se centran en detectar perturbaciones en el componente estacional (normal) de la vegetación, indicando el momento de la alteración y su magnitud. Sin embargo, estos enfoques se centran en un re-análisis de los datos, esto es, dado un conjunto de datos completo d , analizar si ocurrió y cuando un evento en alguna de las fechas anteriores. En general, en estos esquemas se estiman métricas asociadas a la estructura de la serie de tiempo, como el máximo anual d_{max} o la derivada inicial de d . Por ejemplo, si la derivada inicial de d cambia significativamente en un pixel con respecto al pixel “no disturbado” en un año dado, es esperable un cambio total o parcial en la cobertura. Por definición, estos enfoques no pueden ser utilizados como esquemas de alerta temprana, ya que en general necesitan un ciclo completo de los datos para estimar de manera robusta una alteración en el componente estacional de la vegetación.

Existe otra estrategia de análisis de series de tiempo, que se basa en la detección en “tiempo casi real” [Adams and MacKay, 2007], la cual no requiere que se complete un ciclo completo de los datos para detectar una alteración en el componente estacional de la vegetación. Específicamente, se quiere responder la siguiente pregunta: dadas las observaciones desde el inicio de la serie hasta el tiempo t (actualidad), las nuevas observaciones d_t, d_{t+1}, \dots ¿cumplen todavía con el comportamiento esperado de la muestra histórica de la serie de tiempo d_1, \dots, d_t ? O más precisamente, ¿el vector de parámetros estimado a partir de la serie actualizada θ_{act} está en el rango histórico $\theta \pm \Delta\theta$? En caso negativo, informaremos que hubo una perturbación en la serie de tiempo. Si esta perturbación se mantiene en el tiempo, se puede afirmar que hubo un cambio estructural en los parámetros que definen la serie del tiempo, vinculada casi seguramente a un cambio de cobertura parcial o total. Por lo tanto, en este esquema queremos detectar perturbaciones en las observaciones que se van adquiriendo y se van anexando el final de la serie de tiempo, en lugar de detectar perturbaciones utilizando únicamente las observaciones históricas.

Ambos esquemas de detección de anomalías (“reanálisis” y “detección en tiempo casi real”) serán utilizados en este proyecto. Entonces, la metodología para el análisis de series temporales se subdividió en dos grandes secciones: (1) monitoreo de las perturbaciones en el componente estacional y tendencia de las series de tiempo (reanálisis) y (2) monitoreo de disturbio en las series temporales en tiempo casi real (detección en tiempo casi real). Para la primer sección nos centraremos en el análisis del componente estacional, tendencia y residuos para los índices ópticos y de microondas [Verbesselt et al., 2010; Ma et al., 2013] y para la segunda en la determinación de puntos de quiebre de las series temporales según lo descrito por [Adams and MacKay, 2007].

3.2. Reanálisis de series de tiempo: monitoreo de las perturbaciones en el componente estacional y tendencia de las series de tiempo

El método que proponemos es un modelo aditivo para separar la componente estacional de las tendencias lineales (Figura 7), el cual se aplicará a cada serie temporal de datos ópticos, microondas pasivas y térmicos (una serie por pixel). El modelo general tiene la forma:

$$\bar{d} = f(\bar{t}, \bar{\theta}) + \bar{e} = \alpha_1 + \alpha_1 t + \sum_{j=1}^k A_j \sin\left(\frac{2\pi j t}{f} + \delta_j\right) + e \quad (3)$$

Donde α_1 es el valor medio de los datos, α_2 es su tendencia en el periodo de estudio, f es la frecuencia (ej., $f=46$ observaciones anuales para series temporales con período de composición de 8-días), A_j es la amplitud y δ_j las fases del modelo armónico², y e es el error aditivo.

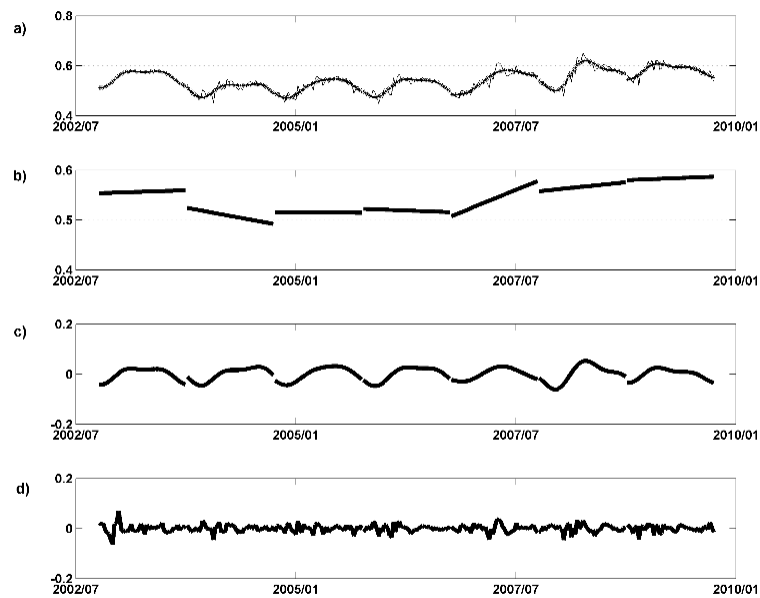


Figura 7. Ejemplo de la descomposición de la serie temporal de VOD del sistema LPRM-AMSR-E (a, línea sólida). El modelo dinámico (a, línea punteada), consiste de una tendencia anual (b), componentes estacionales (c) y residuos (d).

De esta serie modelada se pueden determinar las siguientes métricas fenológicas, siguiendo la metodología descrita por [Ma et al., 2013]: (1) Inicio de la temporada de crecimiento (SGS), (2) pico de la temporada de crecimiento (PGS, valor de la máxima productividad de la vegetación), (3) fin de la temporada de crecimiento (EGS), (4) duración de la temporada de crecimiento (LGS, diferencia entre el final y el inicio del período de crecimiento). Estos indicadores se ilustran en la Figura 8.

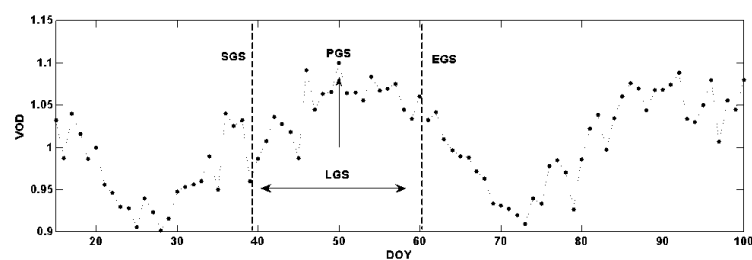


Figura 8. Ejemplo de las métricas fenológicas derivadas de la serie de tiempo de VOD del sistema LPRM-AMSR-E para la ecoregión del chaco seco. SGS (Start of Growing Season) es la fecha del comienzo de la temporada de crecimiento, EGS (End of Growing Season) es la fecha del final de la temporada de crecimiento, LGS (Length of Growing Season) es la duración de la temporada de crecimiento, y PGS (Peak of Growing Season) es el valor máximo durante la temporada de crecimiento.

² El análisis armónico consiste en la representación de las fluctuaciones en el tiempo mediante la suma de una serie de funciones seno y coseno.

En principio, este esquema no se utilizará de manera operativa, ya que no permite detectar alteraciones en la serie en tiempo real. Sin embargo, al ser una metodología bien establecida, permite validar las inferencias realizadas con el método de análisis “en tiempo casi real”.

3.3 Monitoreo de disturbio en las series temporales en tiempo casi real

Esta metodología se basará en una modificación del modelo propuesto por [Adams and MacKay, 2007]. Como se mencionó anteriormente, todos estos métodos dependen de la identificación de períodos estables en las series temporales correspondientes a condiciones no disturbadas, para poder modelar cambios anormales en datos recientemente adquiridos. Para ello, se utilizará la metodología descrita anteriormente para determinar pixeles normales para cada zonificación.

Una vez ajustado el modelo (3) a un pixel y obtenida una nueva observación satelital, en vez de esperar al final del ciclo (como en la metodología anterior), es posible preguntarse cuál es la probabilidad de haber obtenido esta nueva medición si suponemos que la cobertura dentro del pixel no cambió. Formalmente, deseamos calcular la probabilidad de d_{t+1} dado $d_{inicial}...d_t$ y dado $f(t, \theta)$ bajo la hipótesis de que no hubo un disturbio en el tiempo $t+1$,

$$P(d_{t+1}|d_{inicial}...d_t) = \sum_{j \in \Omega} P(d_{t+1}|\theta_j, d_{inicial}...d_t)P(\theta_j) \quad (4)$$

Donde el índice j recorre todo el espacio de los parámetros θ . Esta es una expresión recursiva, que en última instancia depende del modelo (3), el cual fue ajustado utilizando el valor de los pixeles “no disturbados”. Una vez calculado este valor, disponemos al mismo tiempo de la estimación del modelo para el tiempo $t+1$, $E(P(d_{t+1}|d_{inicial}...d_t))$, su error $Var(P(d_{t+1}|d_{inicial}...d_t))$ y del valor observado efectivamente d_{t+1}^{obs} . En la Figura 9 se muestra un ejemplo para el caso del EVI.

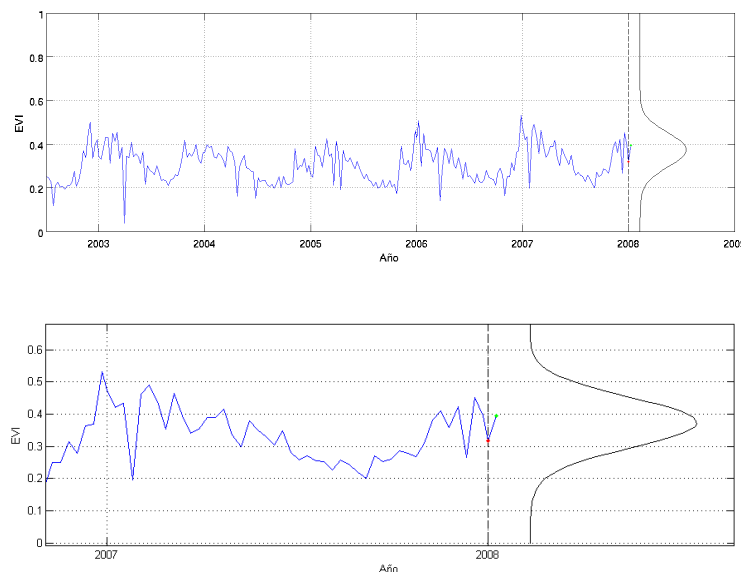


Figura 9. Esquema del análisis de una serie de tiempo “en tiempo casi real” (arriba serie completa, abajo detalle de la inferencia). En azul se presenta la serie de tiempo, en rojo la anteúltima medición (d_t), en verde la última medición (d_{t+1}) y a la derecha, la función densidad de probabilidad a posterior de d_{t+1} dado $d_{inicial}...d_t$ ($P(d_{t+1}|d_{inicial}...d_t)$).

En este marco, es posible calcular la probabilidad de d_{t+1}^{obs} bajo la hipótesis de que no hubo un disturbio en $t+1$. Si la estimación y la medición coinciden (el dato observado está dentro del error del esperado), implica que el pixel en cuestión tiene una dinámica similar al de los pixeles “no disturbados” de su zona, y por ende no hay evidencia para informar una anomalía en la dinámica del índice d para ese pixel. Por el contrario, si la probabilidad de d_{t+1}^{obs} dado el modelo y los datos medidos $P(d_{t+1}^{obs}|d_{inicial}...d_t)$ es menor a un umbral predefinido (ej. 5%), el pixel en cuestión tiene una

dinámica cuantitativamente distinta al de los píxeles “no disturbados” de su zona y podemos informar que existe una anomalía en los datos. Sin embargo, debido a que los datos satelitales están sujetos en general a incertezas (atmosféricas, instrumentales, metodológicas, etc.), una sola medición anómala puede no indicar un cambio en la cobertura. No obstante, un conjunto de mediciones anómalas sucesivas (Ej. $n = 3$) indican inequívocamente un quiebre estructural en la serie de tiempo del producto d , muy probablemente vinculada a un cambio en la cobertura del píxel.

3.4 Determinación de cambios en la cobertura forestal

Existe una amplia gama de técnicas para la detección de cambios en la cobertura forestal utilizando datos satelitales. En general estas técnicas presentan métodos *ad hoc* válidos para zonas específicas (por ejemplo, [Singh, 1989; Jha and Unni, 1994; Cohen et al., 1998; Lunetta et al., 1999; Franklin et al., 2002; Coppin et al., 2004]) y sólo unos pocos fueron utilizados para generar productos de cambio de cobertura forestal a escala regional (por ejemplo, [Skole and Tucker, 1993; Loveland et al., 2002; Huang et al., 2007]).

La generación de un producto de cambio en la cobertura forestal regionalmente coherente y confiable implica la generación de algoritmos automatizados de detección de cambios que requieran mínimos insumos humanos. Para cumplir con este desafío, en este proyecto proponemos desarrollar un método de integración de los análisis de las series temporales de múltiples sensores satelitales (óptico, microondas y térmico) en un único esquema de clasificación conceptual.

Para el mismo, se propone el desarrollo de un clasificador tipo árbol de decisión como el que se muestra en la Figura 10. Se utilizarán las series temporales de índices ópticos, en particular el índice de vegetación mejorado (EVI), y el producto de espesor óptico de la vegetación (VOD) proveniente de los datos de microondas pasivas (SMOS, LPRM-AMSR-E, LPRM-AMSR2 y SMAP). Las perturbaciones de los distintos productos satelitales se interpretarán asumiendo que:

- El VOD es sensible al contenido de agua en la biomasa maderable, por ende una disminución de la biomasa maderable en el píxel analizado conllevará una variación en las métricas derivadas de la serie temporal de VOD.
- El EVI es sensible al LAI y en menor medida al LWC y al contenido de clorofila, por ende una disminución en el LAI en el píxel analizado conllevará una variación en las métricas derivadas de la serie temporal de EVI.
- La Tb-IR es sensible a la temperatura termodinámica del terreno, por ende un aumento en la temperatura implicará un aumento en la temperatura media de la vegetación y el suelo dentro del píxel.

Utilizando estas hipótesis, podremos determinar tres categorías bien definidas

- **Sin perturbaciones en la serie de tiempo de VOD y EVI:** La serie no presenta un comportamiento dinámico distinto al del bosque “no disturbado”. El píxel se marca como “no disturbado”.
- **Perturbaciones en la serie de tiempo de VOD pero no en la de EVI:** la serie presenta perturbaciones con respecto al comportamiento dinámico del bosque “no disturbado” únicamente en el VOD, vinculado a una disminución en la biomasa maderable pero no del LAI. Escenario de degradación posiblemente vinculado a tala selectiva (eliminación de los individuos dentro del bosque que aportan más biomasa) pero sin eliminación del sotobosque (LAI normal). El píxel se marca como “posible tala selectiva”.
- **Perturbaciones en la serie de tiempo del EVI pero no del VOD:** la serie presenta perturbaciones con respecto al comportamiento dinámico del bosque “no disturbado” en el EVI pero no en el VOD, vinculado a una disminución en el LAI pero no de la biomasa maderable. Escenario poco probable.

- **Perturbaciones en la serie de tiempo de VOD y de EVI:** la serie presenta perturbaciones con respecto al comportamiento dinámico del bosque “no disturbado” en el VOD y en el EVI, vinculado a una disminución tanto en la biomasa maderable como en el LAI. Escenario de degradación posiblemente vinculado a deforestación parcial o total (eliminación de los individuos dentro del bosque que aportan biomasa y LAI). El pixel se marca como “deforestación total o parcial”.

		VOD	
		Perturbación	Normal
EVI	Perturbación	Deforestación parcial o total	
	Normal	Tala selectiva	Bosque no disturbado

Figura 10. Esquema de clases del producto de degradación. Los distintos tipos de disturbios se definen a partir de la presencia o no de perturbaciones en las series temporales de EVI y VOD.

En resumen, las principales clases identificadas en el mapa final serán: áreas de bosque no disturbado, áreas degradadas por procesos de tala selectiva, áreas degradadas por deforestación total o parcial y áreas degradadas por otros procesos (a investigar). Este es un esquema de clasificación básico que se refinará durante el desarrollo del proyecto considerando los siguientes puntos:

- Todas las perturbaciones analizadas en el esquema anterior están asociadas a disminuciones del LAI y/o del VOD, vinculados a procesos de pérdida de biomasa forestal. Sin embargo, también es esperable encontrar aumentos de biomasa forestal de origen antrópico (procesos de reforestación). Estos procesos serán investigados de manera análoga a la descrita anteriormente.
- Las perturbaciones del EVI pueden interpretarse más en detalle utilizando la temperatura T media. Una disminución en la dinámica del EVI asociada a un aumento consistente en T puede indicar un evento de stress hídrico asociado a anomalías negativas en la precipitación.
- Las perturbaciones en las series de tiempo vinculadas a remoción selectiva de biomasa deberían tener asociadas variaciones en la temperatura superficial T.
- Las perturbaciones en las series vinculadas a deforestación suelen tener asociadas eventos de incendio. Esto se estudiará utilizando el producto de incendios de MODIS (resolución espacial de 1km y con un periodo de composición de 8 días (MYD14A2)).
- Cuando se habla del monitoreo de procesos de degradación como tala selectiva, raleo o deforestación utilizando sistemas satelitales, es necesario encontrar una relación con estas mismas variables medidas a campo. Por ende, utilizando el esquema de validación presentado en el próximo punto, se apunta a determinar los umbrales de detección mínimos asociados a cada clase de degradación definida utilizando esta metodología.

3.5. Validación del producto de degradación

Un producto de deforestación derivado de sistemas satelitales de baja resolución espacial requiere obligatoriamente de un esquema de validación. El problema clave es cómo comparar imágenes de alta y baja resolución. Una comparación píxel a píxel no es factible para varias razones. En primer lugar, el área cubierta por las imágenes de alta resolución (16x16 km², modo *Wide Swath*) es menor que la resolución espacial de los sistemas pasivos en microondas (25x25 km²). Esto lleva a un esquema anidado de validación [Tian et al., 2002]. Este consistirá de un producto de degradación a una escala más fina, usando imágenes de resolución media (Landsat TM 5 y 8, con una resolución espacial de 30 m) y en áreas selectas un producto de resolución alta (WorldView-2, Quickbird, ~ 1 a 3 m).

El esquema de validación de producto consistirá de los siguientes pasos:

1. Definición de un **periodo de entrenamiento** del algoritmo (2002-2014), donde se procesaran los datos históricos de las series de tiempo de VOD, EVI y T.
2. Determinación de **sitios de entrenamiento** donde se registraron eventos de degradación en el periodo de entrenamiento. Para ello se utilizará información histórica (GIS, imágenes, datos de campo) para determinar el alcance espacial y la magnitud de la degradación. Esta información será provista por la Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal (UMSEF).
3. Obtención y procesamiento de datos de media y alta resolución de los sitios de entrenamiento correspondientes al periodo comprendido por un año antes y unos después del evento registrado.
4. Generación de mapas de degradación de media y alta resolución de los sitios de entrenamiento basados en técnicas estándar.

En resumen, se utilizarán imágenes de media y alta resolución para validar los productos previamente desarrollados. En dichas imágenes de media/alta resolución se identificarán distintos niveles de degradación/deforestación según el esquema de clases de los productos mencionados utilizando una clasificación supervisada. Este producto será validado con información de campo provisto por la Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal (UMSEF) de la Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable (SAyDS).

Con esta metodología se validarán en los sitios de entrenamiento los resultados del esquema de clasificación basado en el análisis de series temporales. Es esperable que exista una fracción de los cambios de cobertura que no sea capturada mediante el análisis de series de tiempo de sistemas de baja resolución (MODIS, LPRM-AMSR-E, LPRM-AMSR2 y SMOS) y que sí pueda detectarse con Landsat. Este umbral mínimo de detección será a la vez una función de la extensión del área y la disposición espacial del cambio. La cuantificación de estos umbrales permitirá asociar un error y una sensibilidad al producto de degradación propuesto.

3.6. Resumen de la metodología

En la figura 11 se presenta un esquema simplificado de la metodología propuesta.

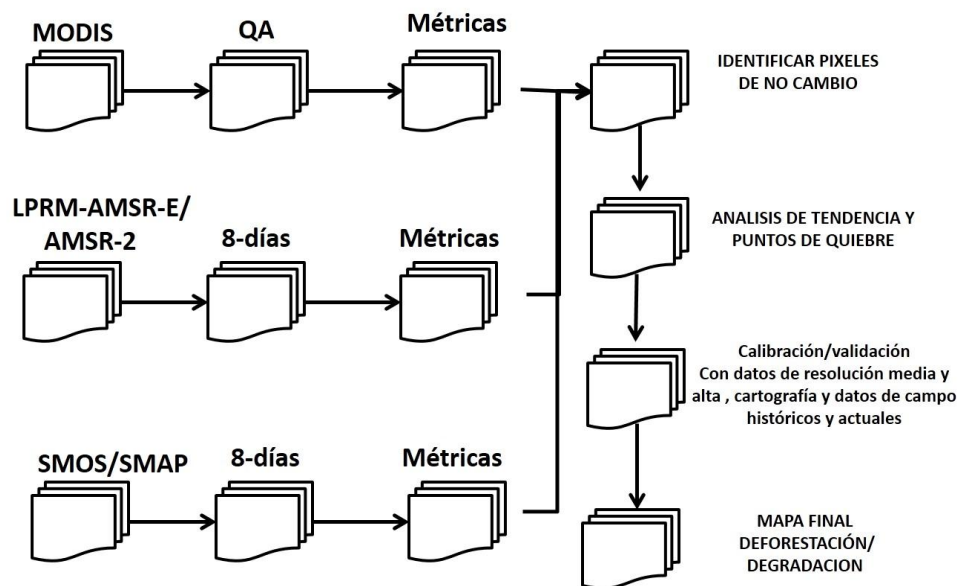


Figura 11. Esquema conceptual de la metodología propuesta

En la primera etapa se procesaran datos históricos correspondientes al período de entrenamiento y se identificarán píxeles “no disturbados” (áreas de bosque que han permanecido constantes en los últimos años) en la serie de tiempo de EVI, de VOD y de Tb. Estos serán caracterizados utilizando información de la UMSEF e imágenes de media y alta resolución, asegurándonos que las métricas fenológicas y el análisis en tiempo casi real confirmen la suposición de bosque no disturbado. Después, se procederá a entrenar el algoritmo de monitoreo en tiempo casi real, utilizando los sitios disturbados analizados con la metodología de validación anidada descrita previamente, de manera de detectar los cambios estructurales en las series de VOD y EVI. Estas estimaciones serán corroboradas *ex post* utilizando el esquema de reanálisis de series de tiempo mencionado anteriormente.

3.7. Divulgación y validación del producto por expertos

Una vez validado el producto propuesto utilizando imágenes de alta resolución ópticas y métodos de análisis de series de tiempo ya establecidos, será publicado en formato mapa de manera sistemática. Sin embargo, como etapa final de validación se propone la interconsulta con expertos en el tema bosques y degradación, de manera de evaluar si los patrones espaciotemporales de degradación estimados por el producto son consistentes con otros productos de degradación disponibles y la experiencia de los expertos en el área. Por último, se propone la divulgación del producto y sus características en talleres ad hoc a realizarse en el IAFE y/o en otras instituciones afines a esta convocatoria.

Definición de términos

Microondas pasivas: porción de la energía emitida naturalmente por un cuerpo en el rango de la microondas (1 - 100 GHz)

Enhanced Vegetation Index (EVI): índice de vegetación “optimizado” para minimizar efectos de saturación por alta biomasa y efectos atmosféricos.

Vegetation Optical Depth (VOD): cociente entre la energía incidente y transmitida a través de la vegetación. Transmisividad de la vegetación a la frecuencia de las microondas.

Leaf Area Index (LAI): Índice de área foliar.

Canopy Water Content (CWC): Contenido de agua del dosel, medido en Kg/Kg.

AMSR-E: Advanced Microwave Scanning Radiometer (www.ghcc.msfc.nasa.gov/AMSR/).

LPRM: Land Parameter Retrieval Model.

AMSR-2: Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_W/w_amsr2/)

SMOS: Soil Moisture and Ocean Salinity (http://www.esa.int/SMOS/Mapping_moisture)

SMAP: Soil Moisture Active Passive (smap.jpl.nasa.gov/)

MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (modis.gsfc.nasa.gov/)

Serie de tiempo: secuencia de observaciones satelitales de una región dada ordenadas cronológicamente, provenientes de un mismo sensor.

Píxeles “no disturbados”: píxeles correspondientes a áreas no disturbadas (porcentaje de bosque nativo > 95%) a la fecha.

Modelo “no disturbado”: modelo estadístico que captura la dinámica de un índice dado para los píxeles “no disturbados”

Perturbación: cambio del valor del vector de parámetros estimado θ_{act} a un valor fuera del rango histórico $\theta \pm \Delta\theta$.

Reanálisis: detección de perturbaciones en una serie de tiempo utilizando análisis anuales.

Detección en tiempo casi real: detección de perturbaciones fecha a fecha de una serie de tiempo.

Deforestación: disminución de la superficie cubierta de bosque provocado generalmente por la acción del hombre.

Tala selectiva: tala sobre ejemplares o especies seleccionados según algún criterio.

Referencias

- Adams, R. P., and D. J. MacKay (2007), Bayesian online changepoint detection, *ArXiv Prepr. ArXiv07103742*.
- Andela, N., Y. Y. Liu, A. I. J. M. van Dijk, R. A. M. de Jeu, and T. R. McVicar (2013), Global changes in dryland vegetation dynamics (1988–2008) assessed by satellite remote sensing: comparing a new passive microwave vegetation density record with reflective greenness data, *Biogeosciences*, *10*(10), 6657–6676, doi:10.5194/bg-10-6657-2013.
- Barraza, V., F. Grings, M. Salvia, P. Perna, A. E. Carbajo, and H. Karszenbaum (2013a), Monitoring and modelling land surface dynamics in Bermejo River Basin, Argentina: time series analysis of MODIS NDVI data, *Int. J. Remote Sens.*, *34*(15), 5429–5451, doi:10.1080/01431161.2013.791759.
- Barraza, V., F. Grings, P. Ferrazzoli, M. Salvia, M. Maas, R. Rahmoune, C. Vittucci, and H. Karszenbaum (2013b), Monitoring Vegetation Moisture Using Passive Microwave and Optical Indices in the Dry Chaco Forest, Argentina, *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens., Early Access Online*, doi:10.1109/JSTARS.2013.2268011.
- Barraza, V., F. Grings, P. Ferrazzoli, A. Huete, N. Restrepo-Coupe, J. Beringer, E. Van Gorsel, and H. Karszenbaum (2014a), Behavior of multitemporal and multisensor passive microwave indices in Southern Hemisphere ecosystems, *J. Geophys. Res. Biogeosciences*, *119*(12), 2014JG002626, doi:10.1002/2014JG002626.
- Barraza, V., F. Grings, P. Ferrazzoli, M. Salvia, M. Maas, R. Rahmoune, C. Vittucci, and H. Karszenbaum (2014b), Monitoring Vegetation Moisture Using Passive Microwave and Optical Indices in the Dry Chaco Forest, Argentina, *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, *7*(2), 421–430, doi:10.1109/JSTARS.2013.2268011.
- Basuki, T. M., A. K. Skidmore, P. E. van Laake, I. van Duren, and Y. A. Hussin (2012), The potential of spectral mixture analysis to improve the estimation accuracy of tropical forest biomass, *Geocarto Int.*, *27*(4), 329–345.
- Bounoua, L., R. DeFries, G. J. Collatz, P. Sellers, and H. Khan (2002), Effects of land cover conversion on surface climate, *Clim. Change*, *52*(1-2), 29–64.
- Cohen, W. B., M. Fiorella, J. Gray, E. Helmer, and K. Anderson (1998), An efficient and accurate method for mapping forest clearcuts in the Pacific Northwest using Landsat imagery, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, *64*(4), 293–299.
- Coppin, P., I. Jonckheere, K. Nackaerts, B. Muys, and E. Lambin (2004), Review Article Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review, *Int. J. Remote Sens.*, *25*(9), 1565–1596, doi:10.1080/0143116031000101675.
- DeFries, R. S., C. B. Field, I. Fung, G. J. Collatz, and L. Bounoua (1999), Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity, *Glob. Biogeochem. Cycles*, *13*(3), 803–815.
- Franklin, S. E., M. B. Lavigne, M. A. Wulder, and G. B. Stenhouse (2002), Change detection and landscape structure mapping using remote sensing, *For. Chron.*, *78*(5), 618–625.
- Gasparri, N. I. (2010), Efecto del cambio de uso de la tierra sobre la cobertura vegetal y dinámica de biomasa del chaco semiárido Argentino, Tesis de doctorado, Facultad De Ciencias Naturales E Instituto Miguel Lillo, Universidad nacional de Tucumán, Argentina.

- Gasparri, N. I., and G. Baldi (2013), Regional patterns and controls of biomass in semiarid woodlands: lessons from the Northern Argentina Dry Chaco, *Reg. Environ. Change*, 13(6), 1131–1144.
- Huang, C. et al. (2007), Rapid loss of Paraguay's Atlantic forest and the status of protected areas — A Landsat assessment, *Remote Sens. Environ.*, 106(4), 460–466, doi:10.1016/j.rse.2006.09.016.
- Huete A., C. Justice, W. V. Leeuwen (1999), Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland 20771, USA.
- Jha, C. S., and N. V. M. Unni (1994), Digital change detection of forest conversion of a dry tropical Indian forest region, *Int. J. Remote Sens.*, 15(13), 2543–2552, doi:10.1080/01431169408954265.
- Jones, M. O., J. S. Kimball, L. a. Jones, and K. C. McDonald (2012), Satellite passive microwave detection of North America start of season, *Remote Sens. Environ.*, 123, 324–333, doi:10.1016/j.rse.2012.03.025.
- Liu, Y. Y., A. I. Dijk, M. F. McCabe, J. P. Evans, and R. A. Jeu (2013), Global vegetation biomass change (1988–2008) and attribution to environmental and human drivers, *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 22(6), 692–705.
- Loveland, T. R., T. L. Sohl, S. V. Stehman, A. L. Gallant, K. L. Saylor, and D. E. Napton (2002), A STRATEGY FOR ESTIMATING THE RATES OF RECENT UNITED STATES LAND-COVER CHANGES, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 68(10).
- Lunetta, R. S., C. D. Elvidge, and others (1999), *Remote sensing change detection: environmental monitoring methods and applications.*, Taylor & Francis Ltd.
- Ma, X. et al. (2013), Spatial patterns and temporal dynamics in savanna vegetation phenology across the North Australian Tropical Transect, *Remote Sens. Environ.*, 139, 97–115.
- Ojima, D. S., K. A. Galvin, and B. L. Turner (1994), The global impact of land-use change, *BioScience*, 300–304.
- Sader, S. A., R. B. Waide, W. T. Lawrence, and A. T. Joyce (1989), Tropical forest biomass and successional age class relationships to a vegetation index derived from Landsat TM data, *Remote Sens. Environ.*, 28, 143–198.
- Sahin, V., and M. J. Hall (1996), The effects of afforestation and deforestation on water yields, *J. Hydrol.*, 178(1), 293–309.
- Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable - SAyDS (2007). *Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos. Informe regional Parque Chaqueño*. Buenos Aires: SAyDS.
- Singh, A. (1989), Review Article Digital change detection techniques using remotely-sensed data, *Int. J. Remote Sens.*, 10(6), 989–1003, doi:10.1080/01431168908903939.
- Skole, D., and C. Tucker (1993), Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon. Satellite data from 1978 to 1988, *Science(Washington)*, 260(5116), 1905–1910.
- Tian, Y. et al. (2002), Multiscale analysis and validation of the MODIS LAI product: I. Uncertainty assessment, *Remote Sens. Environ.*, 83(3), 414–430, doi:10.1016/S0034-4257(02)00047-0.

Townshend, J. R. G., and C. O. Justice (1988), Selecting the spatial resolution of satellite sensors required for global monitoring of land transformations, *Int. J. Remote Sens.*, 9(2), 187–236, doi:10.1080/01431168808954847.

Verbesselt, J., R. Hyndman, A. Zeileis, and D. Culvenor (2010), Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series, *Remote Sens. Environ.*, 114(12), 2970–2980.

Verbesselt, J., A. Zeileis, and M. Herold (2012), Near real-time disturbance detection using satellite image time series, *Remote Sens. Environ.*, 123, 98–108.