

SEPA: Herramientas satelitales para el Seguimiento de la producción agropecuaria y los recursos naturales

Fischer M.A.^{1,3}; Oricchio P.A.¹; Gusmerotti L.¹; Beget M.E.¹; Mercau J.²; Mendoza P.¹; Posse G.¹

¹ Instituto de Clima y Agua - CIRN - INTA

² AER San Luis - CR La Pampa San Luis - INTA

³ fischer.maria@inta.gob.ar

SEPA ("Herramientas satelitales para el Seguimiento de la Producción Agropecuaria") es una iniciativa que fue desarrollada por investigadores del Instituto de Clima y Agua (CIRN-INTA) con el fin de ofrecer productos, elaborados a partir de imágenes satelitales, que sean útiles para la toma de decisiones en el sector agropecuario.

Desde 1997, el Instituto de Clima y Agua recibe y procesa imágenes de diferentes plataformas satelitales. Algunas de las primeras imágenes recibidas pertenecían a la serie NOAA-AVHRR y GOES, mientras que, en 2008, la Institución incorporó la recepción de MODIS (Aqua-Terra) y en el 2014 de Suomi NPP. Desde el 2008, la página web de SEPA (<https://sepa.inta.gob.ar/>) ofrece periódicamente productos (mapas temáticos) asociados a: índices de vegetación (NDVI, EVI), agrometeorología (evapotranspiración real máxima, temperatura de superficie, albedo), agua en el suelo (porcentaje, variación, confort hídrico), escenarios evolutivos de la vegetación (para cultivos de invierno, de verano y perennes), eventos extremos (heladas, incendios, inundaciones, actividad volcánica), y anomalías mensuales e históricas de dichas variables. En el marco de SEPA, y a partir de jornadas de capacitación, o comunicación por correo electrónico y redes sociales, se busca fortalecer la relación con los usuarios para adecuar la información brindada y nuevos desarrollos a las necesidades del sector.

SEPA fue premiado por la Honorable Cámara de Diputados de la Nación en el año 2009 como sitio de interés (4809-D-2009).



ÍNDICE

1- ANTECEDENTES	3
2- RECEPCIÓN Y PROCESAMIENTO	4
3- ÍNDICES DE VEGETACIÓN	5
4- AGROMETEOROLOGÍA	9
5- AGUA EN EL SUELO	13
6- ESCENARIOS EVOLUTIVOS	17
7- EVENTOS EXTREMOS	17
8- FOCOS DE CALOR	18
9- INFORMES	20
10- AGRADECIMIENTOS	21
11- DISEÑO GRÁFICO	21
12- REFERENCIAS	21

1- ANTECEDENTES

La teledetección es una poderosa herramienta que nos permite obtener información detallada sobre la superficie de la Tierra mediante sensores remotos ubicados en plataformas como satélites, aviones y drones, entre otros. Esta técnica se basa en la detección de la radiación reflejada o emitida por la Tierra en distintas bandas del espectro electromagnético, lo cual proporciona información esencial sobre la vegetación, el clima, la geología y otros aspectos de la superficie.

La teledetección pasiva, a partir de la cual se elaboran los productos descriptos más adelante, se basa en la interacción de la radiación electromagnética proveniente del Sol con la superficie terrestre. Cada tipo de superficie posee características propias de absorción y reflexión de energía. Por ejemplo, la vegetación refleja la radiación en el espectro del infrarrojo cercano de manera diferente a las áreas urbanas o a las superficies cubiertas por agua. Esto permite identificar diferentes coberturas y cambios en cada una a partir de su seguimiento temporal. Debido a que la fuente de energía es el Sol, la atmósfera con sus vapores y gases puede interferir en la medición de la superficie. Por este motivo, sobre las imágenes recibidas es necesario realizar correcciones tanto geométricas como radiométricas. Una vez que los datos están corregidos, se aplican técnicas de procesamiento de imágenes para interpretar y analizar la información. El cálculo de índices espectrales (a partir de algoritmos matemáticos que combinan la reflectancia detectada en las diferentes bandas espectrales) permite realzar características de la superficie terrestre y relacionarlos con diferentes variables biofísicas (Rouse et al., 1974; Liu & Huete, 1995).

Las agencias espaciales de distintos países han desempeñado un papel crucial en el desarrollo de la tecnología satelital y la creación de índices espectrales para el uso e interpretación de ese tipo de información. La NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio) de Estados Unidos ha liderado múltiples misiones satelitales, como Landsat y MODIS, que proporcionan datos vitales para el monitoreo de la superficie terrestre y la evaluación ambiental mediante índices espectrales. La ESA (Agencia Espacial Europea), por su parte, ha contribuido significativamente con sus satélites Sentinel, parte del programa Copernicus, que ofrecen información detallada y de alta resolución útil para el estudio del cambio climático y la gestión de recursos naturales. En Argentina, la CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) ha lanzado satélites como el SAOCOM, que brindan datos para la agricultura y la gestión de emergencias mediante el uso de índices espectrales. También, el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), en nuestro país, utiliza información satelital de distintas fuentes para ofrecer productos útiles para la toma de decisiones

agropecuarias y el seguimiento de los recursos naturales, demostrando la relevancia de la cooperación entre agencias espaciales y entidades nacionales en la aplicación de tecnologías avanzadas para el desarrollo sostenible.

2- RECEPCIÓN Y PROCESAMIENTO

Desde el año 1997 el Instituto de Clima y Agua del INTA Castelar, comenzó a recibir imágenes de satélites de órbita polar de la serie NOAA (sigla en inglés de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos) con una antena propia. Luego, en los años 2003 y 2012, se instalaron nuevas antenas y actualizaciones con tecnologías más modernas que permiten recibir imágenes de 7 plataformas satelitales (NOAA 15, 18 y 19, METOP-a, Terra, Aqua y S-NPP), obteniendo información del territorio nacional varias veces al día.

El proceso de recepción de una imagen consiste en que el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) registra el momento en que pasa el satélite sobre el área de captura y comienza la recepción de datos, es decir, el registro de pulsos eléctricos y su conversión en valores digitales. Luego, un servidor procesa y convierte los valores digitales en valores de reflectancia o emisividad según corresponda a la longitud de onda recibida, al mismo tiempo que localiza esos valores en el terreno para generar una imagen georreferenciada. De esta forma, para cada punto (del cual se tiene su coordenada geográfica) se obtiene el valor correspondiente. A cada uno de esos puntos, se lo denomina píxel y es la unidad más pequeña de una imagen digital que representa un área específica en la superficie de la Tierra y contiene información sobre la misma. Dependiendo de las bandas recibidas, del horario de captura, y de la resolución espacial del sensor (tamaño de píxel), se desarrollan modelos y algoritmos para la generación de productos de síntesis. Estos productos son publicados periódicamente como mapas temáticos en SEPA (<https://sepa.inta.gob.ar/>).

Dentro de los productos de síntesis, se encuentran los destinados al seguimiento de la vegetación (índices de vegetación y sus anomalías temporales), los agrometeorológicos, los que evalúan escenarios evolutivos de la vegetación para diferentes campañas, los de monitoreo de eventos extremos, los focos de calor o los productos de análisis comparativos de los focos respecto la serie histórica de información. A su vez, de manera periódica se confecciona un informe mensual de situación en el territorio nacional que también se pone a disposición de forma libre y gratuita en SEPA.

3- ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Los índices de vegetación son herramientas fundamentales en la teledetección y el análisis de datos espectrales. Se utilizan para evaluar el estado y la densidad de la cobertura vegetal y se calculan utilizando combinaciones de algunas bandas espectrales para resaltar las diferencias en la reflectancia de la vegetación. Uno de los índices más conocidos es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada -IVN- (o NDVI en inglés) desarrollado por Rouse et al., 1974. El IVN normalizado se calcula como la diferencia entre la reflectancia en las bandas del infrarrojo cercano y el rojo del espectro visible, dividida la suma de ambas. Valores altos de IVN están asociado a vegetación fotosintéticamente activa, mientras que valores bajos sugerirían menor cobertura vegetal o estrés vegetativo. Existen otros índices, como el Índice de Estrés Hídrico (o NDWI en inglés, Bo-Cai Gao, 1996), que sirve para evaluar el contenido de agua en las plantas, el Índice de Vegetación Mejorado (o EVI en inglés, Huete et al., 1999), que corrige limitaciones del IVN por presencia de suelo desnudo o alta densidad de la vegetación, o el Índice de Condición de Vegetación -ICV- (o VCI en inglés, Kogan, 1990), que compara el valor actual del NDVI respecto del rango histórico de ese índice en la misma época del año, o sea que lo relativiza respecto a sus valores históricos.

Los índices de vegetación son útiles para el monitoreo de cultivos, el seguimiento y manejo de los forrajes, la estimación del riesgo de incendios forestales, la gestión de recursos naturales o la evaluación de cambios en el uso de la tierra, entre otras aplicaciones. Al proporcionar información cuantitativa sobre el estado de la vegetación, estos índices son herramientas esenciales para la toma de decisiones en diferentes campos, tales como la agricultura y la conservación ambiental.

Si bien la recepción de información es diaria, como así también el cálculo de los índices de vegetación para cada imagen, al tratarse de sensores pasivos que necesitan de una fuente de energía externa (en este caso el sol), la obtención de información de la superficie está limitada por la presencia de nubes. Por este motivo, se calculan compuestos de 8 días, 10 días, 16 días o mensuales, lo que permite excluir de esos compuestos la contaminación por la presencia de nubes o aerosoles, posibilitando la cobertura de casi todo el territorio nacional en los productos generados.

A continuación, se describen los productos ofrecidos periódicamente en la plataforma SEPA (<https://sepa.inta.gob.ar/>) para el seguimiento de la vegetación:

3.1 Compuesto de IVN cada 10 días: se calcula tomando el valor máximo de IVN registrado en cada píxel para una composición de imágenes correspondientes a 10 días (Figura 1). Mensualmente se generan 3 imágenes: del 1 al 10 del mes (1era. década), del 11 al 20 del

mes (2da. década) y del 21 hasta el último día del mes (3ra. década). Para su elaboración se utilizan imágenes del sensor VIIRS del satélite SUOMI-NPP. Este producto está disponible desde 2014 a una resolución espacial de 375 metros (14,06 ha).

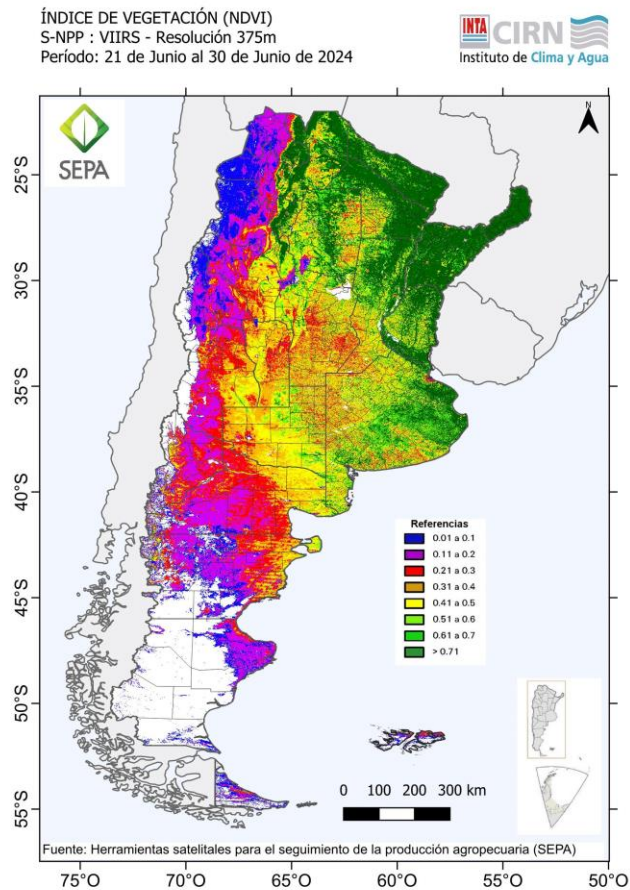


Figura 1. Índice de Vegetación Normalizado elaborado cada 10 días con información del satélite S-NPP, resolución espacial 14,06 ha.

3.2 Compuesto de IVN cada 16 días: se calcula tomando el valor máximo de IVN registrado en cada píxel para una composición de imágenes correspondientes a 16 días, que se contabiliza a partir del 1 de enero de cada año, obteniéndose 23 imágenes anuales. Para su elaboración se utilizan imágenes del sensor MODIS del satélite TERRA. Este producto está disponible desde 2014 a una resolución espacial de 250 metros (6,25 ha).

3.3 Compuesto de IVN mensual: se calcula tomando el valor máximo de IVN registrado en cada píxel para una composición de imágenes correspondientes a cada mes calendario. Para su elaboración se utilizan imágenes del sensor VIIRS del satélite SUOMI-NPP. Este producto está disponible desde 2014 a una resolución espacial de 375 metros (14,06 ha).

3.4 Compuesto de VCI cada 8 días: El índice de condición de la vegetación -VCI- evalúa el estado de la vegetación respecto a la serie histórica desde 2012 al último año finalizado. Este índice compara el valor actual del IVN cada 8 días respecto al valor máximo y mínimo del mismo período de la serie histórica. Los valores se agrupan en 5 (cinco) clases que permiten sintetizar la condición relativa de la vegetación. Para su elaboración se utilizan imágenes del sensor VIIRS del satélite SUOMI-NPP. Este producto está disponible periódicamente desde 2019 a una resolución espacial de 500 metros (25 ha).

A partir de los productos de índices de vegetación, se elaboran anomalías que permiten comparar la situación actual con periodos anteriores. Estas anomalías son productos que asocian la situación actual con la inmediatamente anterior o, si son históricas, relacionan la situación actual con los datos históricos registrados. Este análisis se realiza mediante el uso de medidas estadísticas como los máximos, promedios y mínimos históricos. De esta manera, las anomalías de vegetación proporcionan una perspectiva clara de las desviaciones respecto a las condiciones normales, facilitando la identificación de tendencias inusuales y ayudando en la toma de decisiones para la gestión agrícola y ambiental.

3.5 Anomalía de IVN cada 10 días: evalúa el comportamiento temporal del IVN entre períodos de 10 días. Este producto permite analizar si el IVN aumentó, disminuyó o permaneció estable en un período de tiempo que comprende los 10 días anteriores y el período actual. Para su elaboración se utilizan imágenes del sensor VIIRS del satélite SUOMI-NPP con una resolución espacial de 375 metros (14,06 ha).

3.6 Anomalía de IVN mensual: evalúa el comportamiento temporal del IVN de un mes en relación con el IVN registrado el mes anterior. Este producto permite analizar si el IVN aumentó, disminuyó o permaneció estable en un período anterior y actual. Para su elaboración se utilizan imágenes del sensor VIIRS del satélite SUOMI-NPP con una resolución espacial de 375 metros (14,06 ha).

3.7 Anomalía histórica de IVN cada 8 días: evalúa el comportamiento temporal del IVN de 8 días respecto del mismo período de la serie histórica de información. Este producto permite analizar si el IVN aumentó, disminuyó o permaneció estable respecto a los máximos, promedios y mínimos históricos calculados para la serie comprendida desde el año 2012 hasta la campaña anterior. Para su elaboración se utilizan imágenes del sensor VIIRS del satélite SUOMI-NPP. Este producto está disponible desde 2019 a una resolución espacial de 500 metros (25 ha).

3.8 Anomalía histórica de IVN cada 16 días: evalúa el comportamiento temporal del IVN de 16 días respecto del mismo período de la serie histórica de información. Este producto

permite analizar si el IVN aumentó, disminuyó o permaneció estable respecto a los máximos, promedios y mínimos históricos calculados para la serie comprendida desde el año 2012 hasta la campaña anterior. Para su elaboración se utilizan imágenes del sensor MODIS del satélite TERRA. Este producto está disponible desde 2014 a una resolución espacial de 250 metros (6,25 ha).

3.9 Anomalía histórica de IVN mensual: evalúa el comportamiento temporal del IVN mensual respecto del mismo período de la serie histórica de información (Figura 2). Este producto permite analizar si el IVN aumentó, disminuyó o permaneció estable respecto los máximos, promedios y mínimos históricos calculados para la serie comprendida desde el año 2012 hasta la campaña anterior. Para su elaboración se utilizan imágenes del sensor VIIRS del satélite SUOMI-NPP. Este producto está disponible desde 2014 a una resolución espacial de 1.000 metros (100 ha).

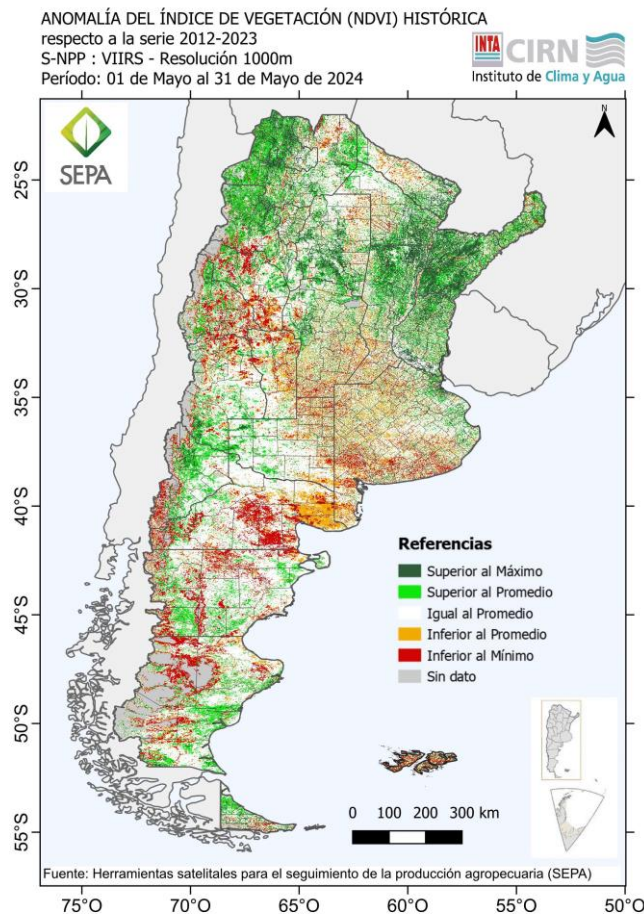


Figura 2. Anomalía histórica del Índice de Vegetación Normalizado elaborado mensualmente con información del satélite S-NPP, resolución espacial 100 ha.

4- AGROMETEOROLOGÍA

Numerosas variables agrometeorológicas como la evapotranspiración (ET), la radiación solar, la temperatura de superficie y la disponibilidad de agua en el suelo afectan directamente al desarrollo de la agricultura, afectando también el estado de los recursos naturales en general. La ET cuantifica la pérdida de agua desde la superficie terrestre debido a la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas y es esencial para la gestión del riego y la conservación del agua (Allen et al., 1998). La radiación solar, como fuente de energía primaria para la fotosíntesis de las plantas y la temperatura de superficie, afectan directamente la productividad de los cultivos (Yang et al., 2019; Asseng et al., 2019). Lo mismo sucede con el agua disponible en el suelo, que modula el crecimiento de la vegetación y se relaciona con potenciales susceptibilidades a estrés hídrico, ataque de enfermedades y peligrosidad de propagaciones de incendios (Hillel, 2004). En conjunto, estos factores agrometeorológicos se han tenido en cuenta en numerosos estudios interdisciplinarios y han aportado valiosa información para el seguimiento de campañas agrícolas utilizando herramientas de teledetección, sistemas de información geográfica y tecnología agrícola avanzada (Weiss et al., 2020).

A continuación, se describen los productos ofrecidos en la plataforma SEPA (<https://sepa.inta.gob.ar/>).

4.1 Evapotranspiración real cada 10 días: La evapotranspiración real (ETR) es la cantidad de agua, expresada en mm/día, que es efectivamente evaporada desde la superficie del suelo y transpirada por la cubierta vegetal. La ETR es una variable clave para el cálculo del balance de agua en el suelo, la detección de estrés hídrico y para ser usada en los modelos de rendimientos de cultivos. El cálculo de la ETR para la región Pampeana se propuso en un trabajo publicado por Di Bella et al., (2000) para sensores a bordo de satélites de la serie NOAA-AVHRR. Mas tarde se modificó el algoritmo para ser calculado a partir de la información de imágenes del sensor VIIRS a bordo del satélite S-NPP, teniendo como variables de cálculo al IVN y a la temperatura de superficie (Ts), de la siguiente forma (Di Bella et al. 2019):

$$ETR = (-1.37 + 9.52 * IVN + 0.14 * Ts)^2$$

Mensualmente se generan 3 imágenes de ETR tomando los valores máximos para una composición de imágenes correspondientes a 10 días: del 1 al 10 del mes (1era. década), del 11 al 20 del mes (2da. década) y del 21 hasta el último día del mes (3ra. década). Las imágenes de ETR se encuentran disponibles desde 2014 a 2018 (calculadas a partir de imágenes NOAA-AVHRR y una resolución de 100 m) y a partir de mayo del 2018 a partir de imágenes del sensor VIIRS del satélite Suomi-NPP (Figura 3), con una resolución espacial de 375 metros (14,06 ha).

EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL MÁXIMA
 Satélite: S-NPP - Resolución 375m
 Período: 21 de Mayo al 31 de Mayo de 2024

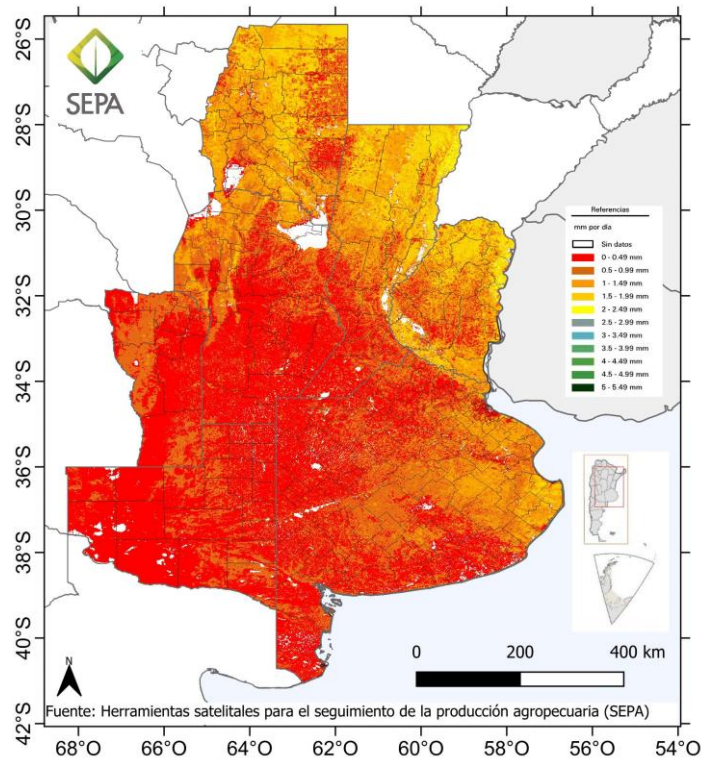


Figura 3. Evapotranspiración real máxima cada diez días estimada cada 10 días mediante información satelital del sensor S-NPP con resolución de 375 metros (14,25 ha).

4.2 Anomalía de evapotranspiración real cada 10 días: La anomalía de evapotranspiración real (ETR) es la comparación entre la cantidad de agua que es evaporada desde la superficie del suelo y transpirada por la cubierta vegetal en un período de 10 días respecto de los valores de ETR históricos registrados en ese mismo periodo desde el 2015 al último año. El valor actual de ETR se compara con la ETR máxima, promedio y mínima histórica registrada y se hace una categorización en donde se distinguen 5 clases: 1- ETR actual mayor a la ETR máxima histórica registrada, 2- ETR actual entre la máxima y la media histórica, 3- ETR actual igual a la media histórica (considerando una variabilidad del 10%), 4- ETR actual entre la media y la mínima histórica, y 5-ETR inferior a la mínima histórica.

4.3 Contenido de agua en el suelo respecto del máximo a 1 y 2m de profundidad: Se desarrolló un modelo de balance hídrico que estima cada diez días el porcentaje de agua útil en el suelo a partir de información de suelo, climática y satelital. Para su elaboración se consideró:

(a) Precipitación acumulada cada diez días (mm), mediante datos diarios registrados en las estaciones meteorológicas del INTA y del SMN (Servicio Meteorológico Nacional);

(b) Evapotranspiración Real acumulada cada diez días, a partir del modelo generado en el Instituto de Clima y Agua con imágenes del satélite Suomi NPP-VIIRS;

(c) Capacidad de retención de agua útil de los suelos del área de acuerdo con su textura, tomando valores propuestos por diferentes autores (Saxton et al., 1986 y 2006; Damiano & Taboada, 2000), a escala 1:50.000, 1:100.000 y 1:500.000. Se consideró una profundidad máxima de 100 y 200 cm; teniendo en cuenta las limitantes de cada tipo de suelo (tosca, horizontes endurecidos y fuertemente texturales, roca expuesta, entre otros).

Este producto calculado para las provincias coloreadas de la fig. 4 se encuentra disponible cada 10 días desde el año 2018 (hasta 100 cm de profundidad) y desde el año 2020 (hasta 200 cm) con una resolución espacial de 375 metros (14,06 ha) hasta la tercera década del mes de abril de 2024 (Figura 4).

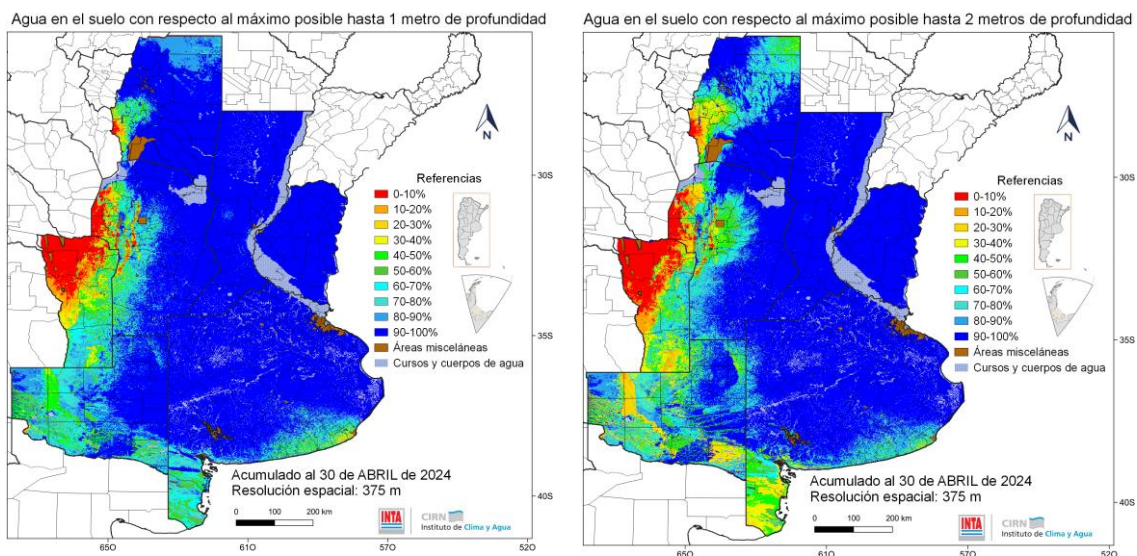


Figura 4. Contenido de agua en el suelo a 1m (izquierda) y 2m (derecha) de profundidad elaborado cada 10 días desde enero de 2018 hasta abril de 2024.

4.4 Cambio en el contenido de agua en el suelo cada 10 días: Este producto evaluó el cambio en el porcentaje de agua disponible en el suelo de un período de 10 días respecto de los 10 días inmediatos anteriores. Permitió analizar cómo aumenta (período actual mayor al anterior), disminuye (período actual menor al anterior) o se mantiene sin cambios el porcentaje de agua disponible en el suelo cada 10 días. Se elaboró a partir de imágenes

registradas por el sensor VIIRS del satélite SUOMI-NPP con una resolución espacial aproximada de 375 metros (14,06 ha) hasta la tercera década del mes de abril de 2024.

4.5 Radiación solar: son mapas de radiación solar media mensual expresada en Watt/m², estimada mediante el modelo GL 1.2 desarrollado en la Universidad De Paraíba para imágenes del canal VIS de Meteosat 4 (Ceballos & Moura, 1997) y adaptado para el Canal VIS de GOES por investigadores de DMS/INPE y UFPb (Bastos et al., 1996). Se utilizan imágenes del satélite geostacionario GOES-16 con una resolución espacial de 4 kilómetros (1600 ha). Las imágenes de los valores medios diarios y mensuales para toda América del Sur están disponibles en <http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/>. La información proporcionada dentro del área que se ofrece fue comparada con datos medidos en 9 puntos de la red solarimétrica de la región pampeana (Convenio INTA - UNLU) a paso horario durante 8 años. Este producto se publica mensualmente desde el año 2019.

4.6 Temperatura de superficie (Ts) cada 10 días: Se calcula el máximo valor por píxel de la Ts registradas en períodos de 10 días. Se utilizan imágenes del sensor VIIRS del satélite Suomi-NPP con una resolución espacial de 14,06 ha.

4.7 Albedo: Representa la porción de radiación visible (energía) que refleja la superficie. Superficies como el agua y la tierra se ven en tonos oscuros (ya que absorben más energía que la que reflejan), mientras que las nubes y la nieve se ven brillantes (reflejan más energía que la que absorben). Estas imágenes provienen del satélite GOES-16 Canal 2 (0,64 μm) y se actualizan cada 15 minutos en presencia de luz solar. Su resolución espacial es de 0,25 km² (2500 ha). Estas imágenes son cortesía de NASA George C. Marshall Space Flight Center Earth Science Branch in Huntsville, Alabama, USA.

4.8 Infrarrojo térmico: Representa la radiación infrarroja expresada como temperatura, emitida por las nubes o la superficie de la tierra. Estas imágenes provienen del satélite GOES-16 Canal 14 (10,2-11,2 μm) y se actualizan de forma automática cada 15 minutos las 24 horas del día. Su resolución espacial es de 2 km (400 ha). Estas imágenes son cortesía de NASA George C. Marshall Space Flight Center Earth Science Branch in Huntsville, Alabama, USA.

4.9 Temperatura de topes nubosos: Representa la radiación infrarroja expresada como temperatura, emitida por las nubes o la superficie de la tierra. Mediante técnicas de realce y con una paleta de colores se busca remarcar aquellas nubes que presentan los topes más fríos. Cuanto menor sea su temperatura (más negativo en sus valores) más alta estará la nube, mayor desarrollo tendrá y mayor será la probabilidad de estar formada por cuerpos de hielo o gotas de gran dimensión. Estas imágenes pertenecen al satélite GOES-16 Canal 14-IR (10,2-11,2 μm) y se actualizan de forma automática cada 15 minutos las 24 horas del día. Su resolución

espacial es de 1.600 ha. Estas imágenes son obtenidas del sitio web <http://cira.colostate.edu/> (Cooperative Institute for Research in the Atmosphere -CIRA-) en conjunto con RAMMB (<http://rammb.cira.colostate.edu/>).

5- AGUA EN EL SUELO

Los productos de estimación del contenido de agua en el suelo y el confort hídrico abarcan las regiones Pampeana, Chaqueña, Semiárida Central y Litoral, cubriendo la mayor parte de la superficie ocupada por los principales cultivos agrícolas extensivos en Argentina.

En principio se calcula un balance hídrico que integra la estimación del ingreso de agua al perfil del suelo por precipitaciones (no incluye riego) y el egreso de agua por evaporación directa y transpiración (evapotranspiración real). Las precipitaciones se estiman a partir de información satelital proveniente del sensor IMERG-GPM, corregida diariamente con datos de estaciones meteorológicas INTA y SMN distribuidas en toda la región (Gusmerotti et al., 2022). Por otro lado, la estimación de la evapotranspiración real se realiza mediante el uso de un coeficiente dual para transpiración y evaporación (Allen, 1998; Mercau et al., 2016). Para ello, se estima la demanda atmosférica diaria a través de una interpolación espacial de la evapotranspiración de referencia (ET_o) según el modelo Penman-Monteith FAO-56 (Allen, 1998), utilizando las variables agrometeorológicas registradas en las estaciones. La ET_o es afectada por un coeficiente asociado a la cobertura verde (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDVI) para determinar la demanda transpiratoria, a la cual se limita por la disponibilidad y facilidad de extracción del agua en el perfil para obtener la transpiración real. En cuanto a la evaporación desde la superficie del suelo, para su estimación se utiliza un modelo de dos fases limitado por la presencia de material muerto, en pie o sobre la superficie del suelo, asociado al Índice de Combustible Muerto (DFI), propuesto por Cao et al. (2010). Tanto el NDVI como el DFI se estiman a partir de imágenes del sensor VIIRS del satélite Suomi-NPP. Es importante destacar que, si el contenido de agua en el suelo supera la capacidad potencial de ser almacenada, el excedente hídrico drena del perfil.

Se considera una profundidad de extracción por parte de las raíces de los cultivos anuales de hasta 2 metros, la cual puede estar restringida por presencia de tosca o piedra y, en menor medida, por texturas de suelo muy arcillosas y/o sódicas. A partir de la textura de cada horizonte se estimó la capacidad de retención de agua útil, su facilidad de extracción por los cultivos y los parámetros que afectan la evaporación desde la superficie. Se utilizaron cartas de suelos INTA en escalas desde 1:50.000 hasta 1:500.000, integrando en cada unidad cartográfica los suelos predominantes, representados por perfiles típicos (Gusmerotti & Mercau, 2022).

Desde el mes de mayo de 2024, se publican diferentes productos en períodos decadales (del día 1 hasta el día 10, del día 11 al 20 y del día 21 hasta el último día de cada mes) de cada mes, con una resolución espacial aproximada de 500 metros (25 ha), los cuales se enumeran a continuación:

5.1 Porcentaje de agua disponible en el suelo: Representa la relación porcentual entre i) el contenido de agua disponible para la vegetación que tiene el perfil (al final del período informado) y ii) la capacidad potencial del suelo para retener agua disponible (Figura 5). Esta información puede utilizarse para conocer cuán completa está la recarga del suelo, lo que modifica la posibilidad de que la vegetación transpire durante todo el día, dado que, por debajo de un determinado umbral, la transpiración está limitada en las horas de mayor demanda. También permite estimar el almacenaje de agua en el suelo al inicio de una época de siembra, lo cual se relaciona con la probabilidad de sufrir futuras sequías.

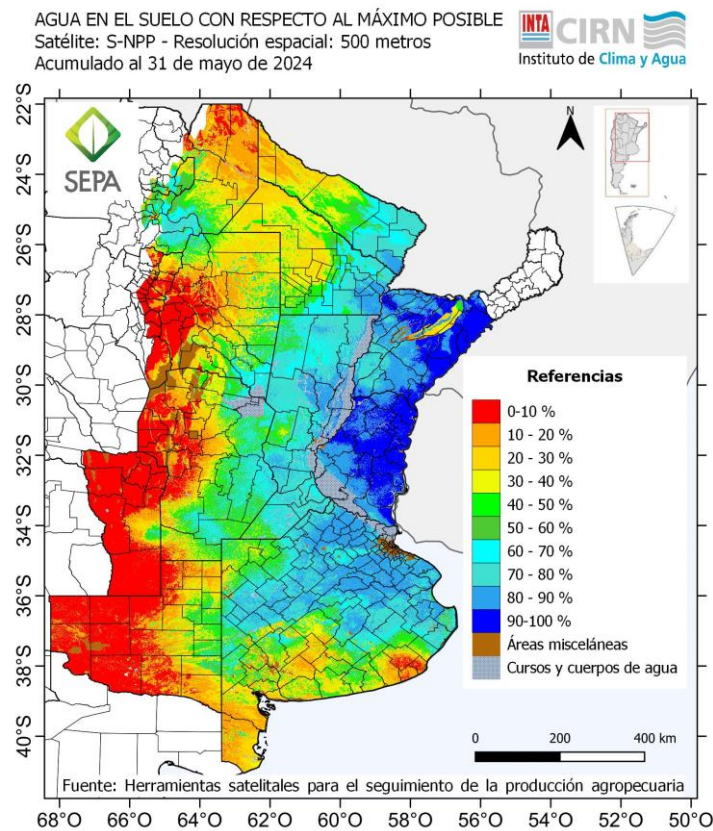


Figura 5. Porcentaje de agua disponible en el suelo con respecto al máximo posible en hasta 2 metros de profundidad elaborada cada 10 días con información del satélite NPP. Resolución espacial: 25 ha.

5.2 Agua disponible en el suelo con respecto al máximo posible en hasta 2 metros:

Muestra el contenido de agua disponible para la vegetación (expresado en mm) al final del período informado. Complementa la información expresada como porcentaje (%) de la capacidad potencial y hace evidente que, en aquellos ambientes con suelos someros o muy arenosos, una recarga alta en % equivale a escasos mm de agua útil.

5.3 Variación del agua disponible:

Evalúa el cambio en el agua disponible (expresado en mm) al final de un período decadal con respecto al final del período anterior (Figura 6). Permite analizar la magnitud del aumento (período actual mayor al anterior) o reducción (período actual menor al anterior) del agua disponible en el perfil en hasta 2 metros de profundidad.

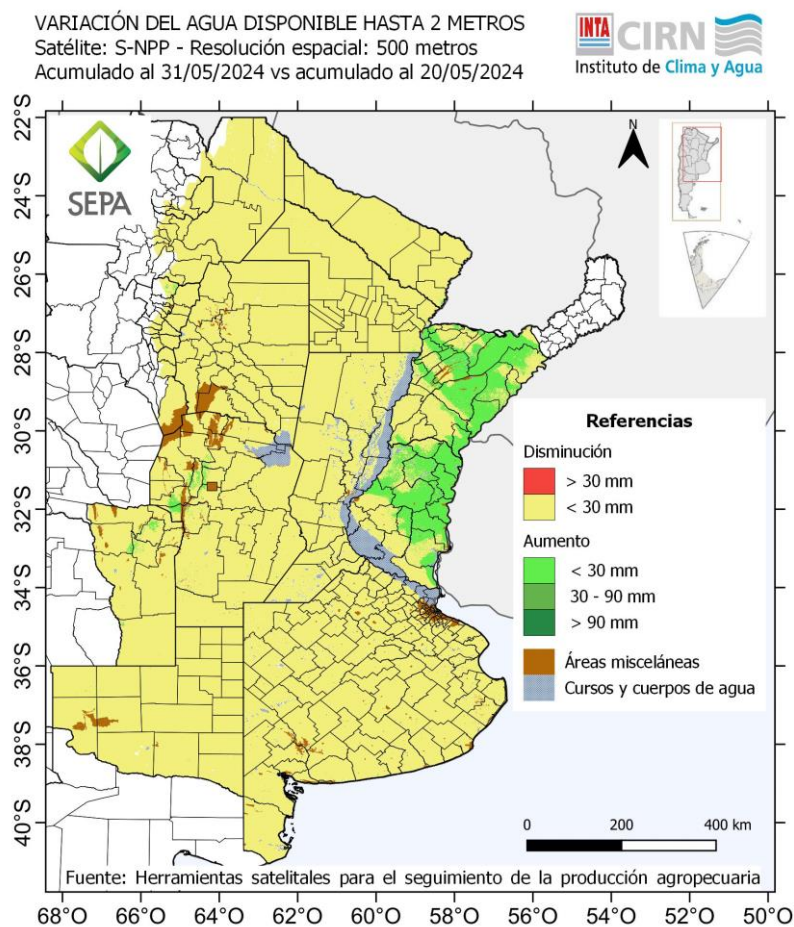


Figura 6. Variación del agua disponible con respecto al período anterior hasta 2 metros de profundidad elaborada cada 10 días con información del satélite NPP, resolución espacial 25 ha.

5.4 Confort hídrico: Es la relación entre i) el agua que transpiró la vegetación, que puede estar restringida por la disponibilidad en el suelo, y ii) la capacidad potencial de los cultivos para transpirar, que depende de la demanda atmosférica y la cobertura verde (Figura 7). Expresa, para el período decadal considerado, en qué porcentaje el cultivo pudo extraer

desde el suelo el agua que necesitaban sus hojas para mantener los estomas abiertos. Cuando las hojas cierran sus estomas se reduce la pérdida de agua, pero también cesa la ganancia de carbono y, por lo tanto, el crecimiento del cultivo es menor. Para fijación de carbono o producción de forrajes, el confort hídrico se asocia a la biomasa generada con respecto a la producción potencial de cada cobertura, si no hay limitación nutricional u otros factores reductores. En producción de granos, si esa reducción ocurre en períodos críticos, el confort hídrico se relaciona directamente con la relación porcentual entre el rendimiento alcanzado y el rendimiento potencial del cultivo, si no existen otras limitantes o reductores. Además, al cerrar sus estomas y reducir la transpiración, las plantas también pierden la capacidad de refrigerar sus tejidos y, si la temperatura del aire es elevada, puede contribuir a que se produzcan daños adicionales por muy altas temperaturas.

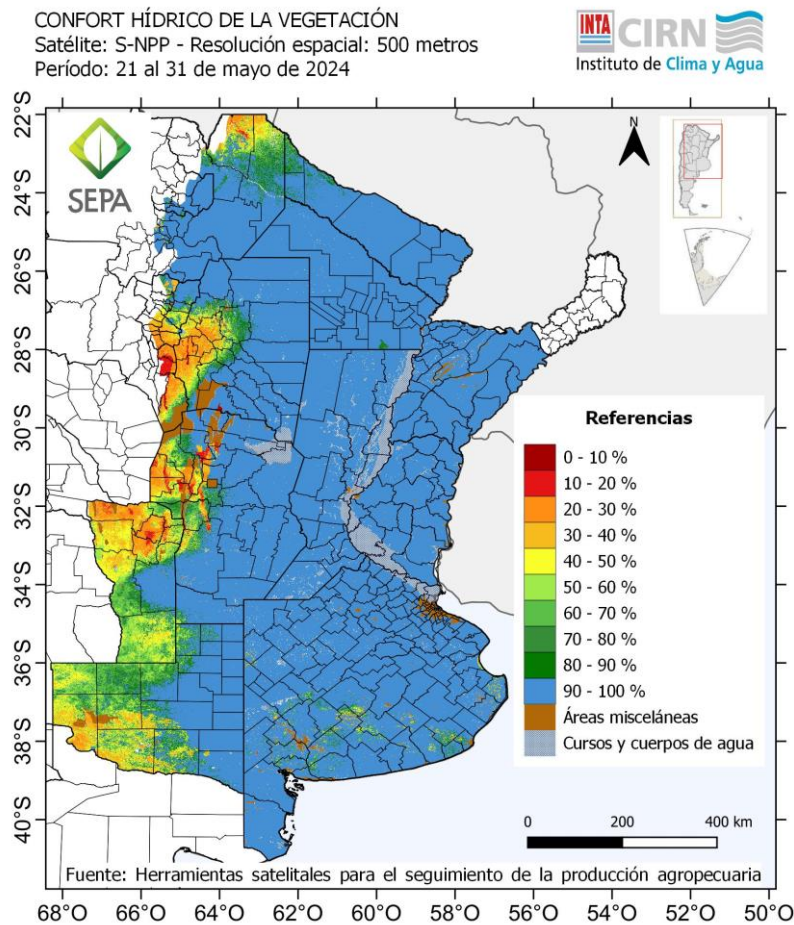


Figura 7. Confort hídrico de la vegetación elaborado cada 10 días con información del satélite NPP, resolución espacial 25 ha.

6- ESCENARIOS EVOLUTIVOS

Los escenarios evolutivos muestran proyecciones posibles de IVN para tres campañas: la campaña de invierno, que considera el período entre julio y diciembre, la campaña de verano, que considera el período entre septiembre y marzo, y la campaña forrajera, en la que se considera el período comprendido entre julio de un determinado año y junio del siguiente. Estos productos son calculados a partir de los valores de IVN registrados desde que inicia la campaña hasta la fecha actual, a los que se le suman los valores máximos y promedios históricos para el resto de los meses, no transcurridos, hasta completar cada campaña. A esos escenarios probables, se los compara con los registros de campañas históricas de una serie de años desde el 2000 al último año cumplido. En los mapas de escenarios evolutivos se señalan en rojo los píxeles que no alcanzarían el promedio histórico, aun teniendo los valores máximos de IVN históricos en el futuro, hasta finalizar la campaña, y en amarillo los píxeles que no alcanzarían el promedio histórico aun considerando valores de IVN futuros promedios hasta finalizar la campaña (Figura 8).

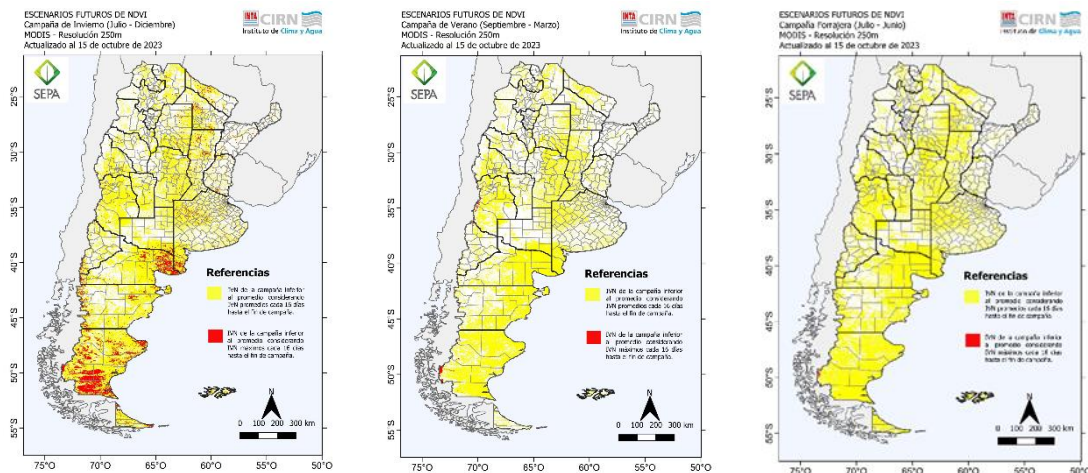


Figura 8. Escenarios futuros para tres campañas: invierno (izquierda), verano (centro) y forrajera (derecha) elaborado cada 16 días con información del satélite MODIS, resolución espacial 6,25 ha.

7- EVENTOS EXTREMOS

Ante la ocurrencia de eventos extremos como heladas, incendios, sequías y otros eventos destacados, se publican imágenes satelitales, en falso color compuesto, o color natural, en conjunto con otra información georreferenciada para visualizar la evolución espacial y temporal del fenómeno. El tipo de sensor y plataforma varía de acuerdo con al tipo de evento, horario y condiciones de nubosidad.

7.1 Heladas: se ofrecen imágenes de Temperatura de superficie (Ts) detectada en el canal infrarrojo del espectro electromagnético (10,2-11,2 μm), luego de la salida del sol, momento en que ocurre la temperatura mínima. Estos mapas dan una idea de la magnitud de las heladas, no sólo en su intensidad sino también en el área afectada. Se utilizan imágenes del sensor AVHRR de los satélites de la serie NOAA y el sensor VIIRS de S-NPP. Este producto se encuentra disponible desde 2013 con una resolución espacial de 100 ha para NOAA y de 14,06 ha para S-NPP.

7.2 Inundaciones: ante la ocurrencia de un evento extremo por intensas precipitaciones se realiza un seguimiento temporal que permite visualizar la evolución de las zonas anegadas. Se utilizan imágenes del sensor AVHRR de los satélites de la serie NOAA con una resolución espacial de 100 ha e imágenes del sensor MODIS de los satélites AQUA y TERRA con una resolución de 6,25 ha.

7.3 Destacados: frente a la presencia de incendios de gran magnitud, nevadas significativas, o actividad volcánica (emanación de gases y la formación de columnas de vapor o cenizas, y su posterior traslado por acción de los vientos), entre otros, se presentan imágenes satelitales para la visualización y el monitoreo del área afectada. Cada evento se nombra de acuerdo con el tipo de disturbio (incendio, nieve, volcanes).

8- FOCOS DE CALOR

Los focos de calor son anomalías de temperatura que se detectan a partir de cambios en la energía reflejada/emitada por la superficie terrestre. Cada foco de calor representa el centro de un píxel donde se detectaron anomalías térmicas. El tamaño mínimo de incendio detectable depende de diferentes factores, entre los cuales pueden destacarse el tipo de sensor, el ángulo de observación, el bioma, la posición del sol, la temperatura de la superficie terrestre, la cobertura de nubes, la cantidad de humo, la dirección del viento, entre otros. El sensor MODIS detecta rutinariamente incendios, ya sean de tipo "llama" o "smoldering" (brasas) de alrededor de 1.000 m². Bajo condiciones de observación muy favorables (por ejemplo, cerca del nadir, poca o ninguna presencia de humo, superficie terrestre relativamente homogénea, etc.), se pueden detectar incendios de llama que son una décima parte de este tamaño. Por tal motivo, no se recomienda estimar el área quemada a partir de los datos de incendios activos. Estos productos han sido validados utilizando observaciones coincidentes del Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer -ASTER- (Csiszar et al. 2006, Morissette et al. 2005, Justice et al. 2002).

En esta sección de SEPA (<https://sepa.inta.gob.ar/>) se publican productos asociados a los focos de calor MODIS como un índice de peligrosidad de incendios, un producto de frecuencia histórica mensual de focos de calor, la anomalía histórica anual de focos por provincia, la anomalía histórica mensual provincial y la anomalía histórica mensual departamental.

8.1 Peligrosidad de incendios: El índice de peligrosidad de incendio que se ofrece, se calcula a partir del análisis temporal del índice de vegetación normalizado –IVN-, asociado a la cantidad y estado de la biomasa vegetal acumulada en superficie. Por ejemplo, valores altos del IVN seguidos de valores bajos pueden asociarse a etapas de acumulación y posterior pérdida de humedad del combustible vegetal, aumentando el índice de peligro en la región.

Para calcular este índice se utilizan imágenes del sensor VIIRS del satélite Suomi-NPP con una resolución espacial de 375 metros (14,06 ha).

8.2 Frecuencia histórica mensual: Estadísticas de focos de calor detectados por el sensor MODIS agrupados en una grilla con celdas de 0,5°x0,5° (55km x 55km). Este producto muestra la frecuencia histórica de focos de calor en 20 años (2001-2021) para cada mes del año para cada celda. En cada celda la frecuencia está expresada en percentiles agrupados en 5 clases: (menor a P25, P25-P50, =P50, P50-P75, mayor a P75).

Este producto ofrece la posibilidad de visualizar los meses del año donde un sitio (celda) concentran más cantidad de focos de calor y los meses cuando se concentran menos cantidad de estos eventos.

8.3 Anomalía histórica anual: Representa las estadísticas de focos de calor detectados por el sensor MODIS a bordo de los satélites AQUA y TERRA con una resolución espacial de 100 ha. Este producto muestra la anomalía anual de los focos de calor respecto de la serie histórica de focos detectados y los focos totales acumulados en el último año transcurrido discriminados por provincia.

8.4 Anomalía histórica mensual provincial: Representa las estadísticas de focos de calor detectados por el sensor MODIS a bordo de los satélites AQUA y TERRA con una resolución espacial de 100 ha. Este producto muestra los focos totales acumulados mensualmente y la anomalía mensual de los focos de calor respecto de la serie histórica de focos detectados (2001-2020) discriminados por provincia.

8.5 Anomalía histórica mensual departamental: Representa las estadísticas de focos de calor detectados por el sensor MODIS a bordo de los satélites AQUA y TERRA con una resolución espacial de 100 ha. Este producto muestra los focos totales acumulados

mensualmente y la anomalía mensual de los focos de calor respecto de la serie histórica de focos detectados (2001 al último año cumplido) discriminados por departamento (Figura 9).

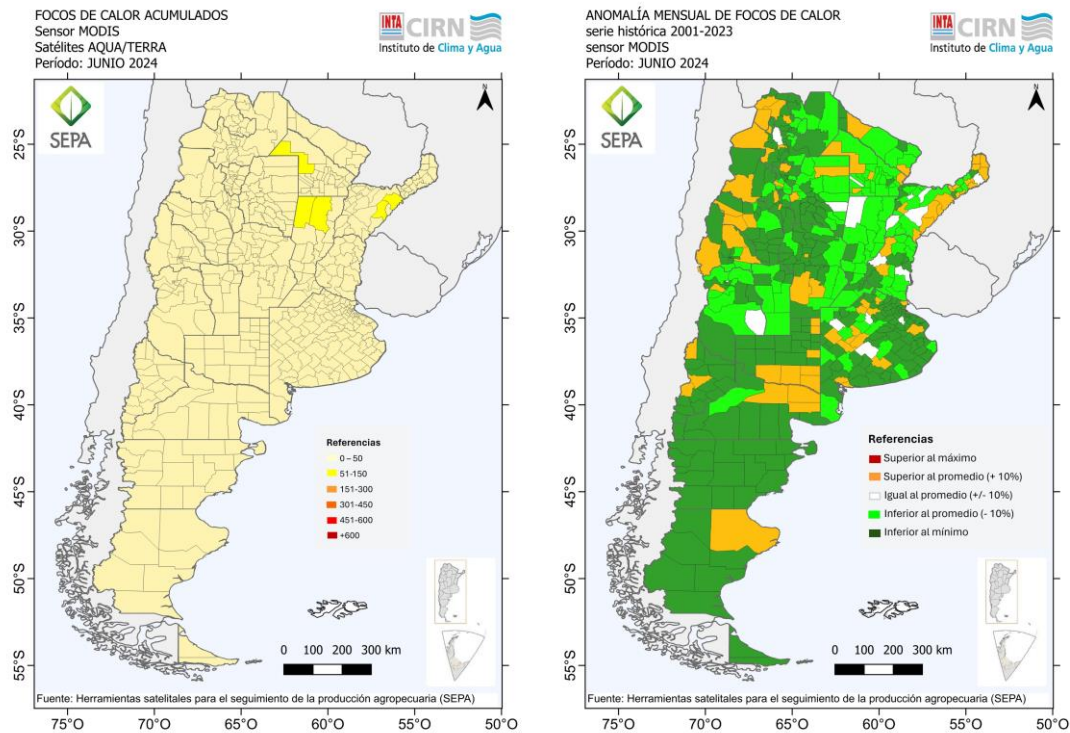


Figura 9. Focos de calor MODIS detectados mensualmente en cada departamento provincial del país (izquierda). Anomalía mensual de los focos de calor MODIS detectados en cada departamento provincial del país (derecha).

9- INFORMES

En SEPA, se elabora y publica un informe mensual que analiza y resume la situación de la cobertura vegetal y de las variables agrometeorológicas en base a los productos previamente mencionados.

Complementariamente, se ponen a disposición de los usuarios otros informes periódicos de utilidad elaborados íntegramente por profesionales del Instituto de Clima y Agua y otros en colaboración con profesionales y entidades externas. Entre ellos podemos mencionar al informe mensual de la Mesa Nacional de Monitoreo de Sequías, integrada por expertos de las instituciones que conforman la Red GIRCYT, que informa sobre las áreas afectadas por sequía en el territorio nacional, los informes agrometeorológicos semanales y mensuales del Instituto de Clima y Agua, informes de estrés hídrico o el informe anual de las redes de estaciones meteorológicas NIMBUS INTA.

10- AGRADECIMIENTOS

Desde la creación de SEPA en el año 2008, destacados profesionales hicieron sus aportes para la creación de esta iniciativa, y para el diseño, la elaboración y actualización de los productos ofrecidos. Entre ellos queremos mencionar a Carlos M. Di Bella, Cesar Rebella, Julieta Straschnoy y Alfredo Campos. Por su parte, también agradecemos a todo el equipo de comunicaciones del CIRN que siempre propiciaron la difusión de los productos generados en el Instituto de Clima y Agua.

11- DISEÑO GRÁFICO

Castañeda, N.

12- REFERENCIAS

- Allen, R.G., Pereira, R. Smith M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Asseng S., Martre P., Maiorano A., Rotter R. P., O'leary G. J., Fitzgerald G. J., et al. (2019). Climate change impact and adaptation for wheat protein. *Glob. Change Biol.* 64, 155–173. 10.1111/gcb.14481.
- Damiano, F., Taboada, M.A. (2000). Predicción del agua disponible usando funciones de pedo-transferencia en suelos agrícolas de la región pampeana. *Revista Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*, 18 (2), 77-88.
- Di Bella, C.M., Oricchio, P. A., Gusmerotti, L.A., Texeira, M. (2019). Actualización del algoritmo de estimación de la evapotranspiración real para el sensor VIIRS-Suomi NPP. *Ecología Austral* 29:428-432 Asociación Argentina de Ecología.
- Di Bella, C.M., Rebella, C., PARUELO, J.M. (2000). Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 21, no. 4, 791–797.
- FAO-56. Food and Agriculture Organization. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and organic Matter for hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal* 70: 1569-1578.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., Papendick, R.I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Soc. of America Journal* 50: 1031-1036.
- Asseng, S., et al. (2019). Climate change impact and adaptation for wheat protein. *Global Change Biology*, 25(1), 155-173.
- Cao, X., Chen, J., Matsushita, B., Imura, H. (2010). Developing a MODIS-based index to discriminate dead fuel from photosynthetic vegetation and soil background in the Asian steppe area. *Int. J. Remote Sens.* 31, 1589–1604.
- Ceballos, C., Moura, G.B. (1997). Solar radiation assessment using Meteosat 4-VIS imagery. *Solar Energy*, Volume 60, Issues 3–4, March–April 1997, Pages 209-219.
- Ceballos, J.C., Porfirio, A.C.S, Oricchio, P., Posse, G. (2022). Characterization of the annual regime of surface solar irradiance over Argentine Pampean Region using GL 1.2 satellite-based data. *Renewable Energy* 2022, DOI: 10.1016.
- Gao, Bo-Cai. (1996). "NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space" (PDF). *Remote Sensing of Environment*. 58 (3): 257–266.

- Gusmerotti, L.A., Mercau, J.L. (2022). Generación de mapas de capacidad de retención de agua útil en la región Chaco-Pampeana argentina. XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires, Argentina. 15 al 18 de noviembre de 2022. Actas Tomo IV: Génesis, clasificación, cartografía y mineralogía de suelos, 1716-1721.
- Gusmerotti, L.A, Di Bella, C.M., Posse, G., Oricchio, P.A. (2022). Metodología de corrección de la precipitación satelital en Córdoba (Argentina). Argentina. Buenos Aires. 2022. Libro, Resumen- Simposio. 51 Jornadas Argentinas de Informática (JAIIO)-Congreso Argentino de AgroInformática (CAI). Sociedad Argentina de Informática (SADIO).
- Hillel, D. (2004). Introduction to environmental soil physics. Elsevier.
- Huete, A., Justice, C., & Van Leeuwen, W. (1999). MODIS vegetation index (MOD13). Algorithm theoretical basis document, 3(213), 295-309.
- Kogan, F.N.F. (1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. International Journal of Remote Sensing 1990, 11, 1405–1419.
- Liu, H.Q., Huete, A. (1995). A feedback-based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 33, 457–465
- Mercau, J.L., Nosetto, M.D., Bert, F., Giménez, R., Jobbágy, E. (2016). Shallow groundwater dynamics in the Pampas: Climate, land scape and crop choice effects. Agricultural Water Management 163, 159–168.
- Monteith, J. L., Unsworth, M. H. (1990) Principles of environmental physics. Academic Press.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS-1 Symposium NASA, NASA SP-351, Washington DC, 309-317.
- Weiss, M., Jacob, F., Duveiller, G. (2020). Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. Remote Sensing of Environment, Volume 236,111402. ISSN 0034-4257. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>.
- Yang, Y., Xu, W., Hou, P., Liu, G., Liu, W., Wang, Y., Zhao, R., Ming, B., Xie, R., Wang, K., Li, S. (2019). Improving maize grain yield by matching maize growth and solar radiation. Scientific Reports 9. 3635. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40081-z>