



Fuegos en Argentina

Estas imágenes del Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - MODIS) muestra incendios (puntos rojos) en Argentina durante enero de 2003. A lo largo de la llanura pampeana (a la derecha) se detectan algunos incendios pequeños, mientras que más al sur, arden otros de mayor tamaño produciendo columnas de humo grises.

Jeff Schmaltz, MODIS Rapid Response Team, NASA/GSFC

Teledetección y fuego en áreas naturales

Carlos M Di Bella,
María de los Ángeles Fischer y
Nicolás A Mari
INTA Castelar

Mientras el término *fuego* designa toda situación en que arden o se queman sustancias, la palabra *incendio* tiende a usarse para nombrar fuegos indeseados o dañinos. En el medio natural –ya sean ámbitos silvestres o de uso agropecuario– esa distinción tiene considerable importancia, pues el fuego puede constituir un factor de equilibrio de ciertos ecosistemas, o ser parte del manejo (acertado o desacertado: esa es otra cuestión) de determinados cultivos, algo diferente del poder destructivo de los incendios. Este artículo abarca ambas situaciones, pero su mira está principalmente en las segundas.

Incendio forestal. Fuente: www.sxc.hu



Fuegos e incendios

Los fuegos son uno de los disturbios más importantes del medio natural en la Argentina. Ocasionalmente ocasionan profundos cambios en la fisonomía del paisaje y, en casos, remueven en forma parcial o total la cobertura vegetal. Cuando exceden el ciclo natural de los ecosistemas, es decir, cuando se convierten en incendios, producen daños importantes, en especial en ambientes boscosos de montaña, en los que la presencia de árboles es fundamental para la regulación de procesos hidrológicos superficiales y subterráneos, y para el clima local, regional y hasta global. Las figuras 1 a 5 muestran algunos efectos de incendios en áreas naturales.

Algo semejante ocurre en los ambientes agropecuarios, en los que, si bien a veces el fuego constituye un recurso de manejo –cada vez menos utilizado–, los incendios accidentales o provocados ocasionan cuantiosas pérdidas económicas y hasta humanas, que a menudo han incluido construcciones, maquinaria y áreas periurbanas.

Los cambios del régimen de fuegos ocurridos en áreas naturales que se advierten actualmente en el país forman parte de un fenómeno global, en el que influyen tanto factores naturales como de origen humano (o *antrópicos*), sobre todo, las modificaciones del uso de la tierra, las prácticas de manejo de áreas naturales y las propias características del medio natural.

La velocidad con que suceden tales cambios y la magnitud de estos generan la necesidad de establecer un mecanismo para su seguimiento ininterrumpido, que abarque todas las escalas o niveles, desde el local y regional hasta el nacional o continental. Para ello, resulta necesario caracterizar las áreas quemadas, describirlas y trazar mapas de ellas. Con esa información se podrá considerar su distribución en el espacio y el tiempo, establecer el estado de la vegetación antes del fuego, elaborar índices de peligro de incendios, evaluar los efectos del fuego sobre la atmósfera y estudiar cómo se regenera la vegetación luego del fuego.

En la Argentina, las estadísticas oficiales de la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable indican que, durante 2003, se quemaron alrededor de tres millones de hectáreas. Estaban cubiertas principalmente por bosques nativos, pastizales y arbustos. Según las mismas estadísticas, la mitad de los fuegos ocurridos ese año tuvieron origen desconocido; y la mitad restante ocurrió, principalmente, por negligencia o acción deliberada.

Información estadística y teledetección

La información estadística retrospectiva sobre áreas quemadas que publica la mencionada Secretaría, si bien resulta muy útil en primera aproximación para conocer



los incendios, no es muy precisa, y su compilación en escala nacional no proporciona un conocimiento suficientemente detallado como para guiar la acción. No permite obtener un panorama por región, ni entender los factores que gobiernan los fuegos.

Por contraste, la *teledetección* se presenta como un camino para obtener en forma práctica y efectiva la información que se necesita sobre los fuegos. El término teledetección significa la percepción de objetos a distancia. Para las cuestiones que trata esta nota, se lleva a cabo, sobre todo, utilizando sensores montados sobre satélites en órbita alrededor de la Tierra. Las aplicaciones de la



teledetección varían de acuerdo con los temas que se consideren, desde los meteorológicos hasta los ambientales, pasando por los agronómicos, los hidrológicos y los geológicos, entre otros. (Ver recuadros 'Teledetección satelital' y 'Aplicaciones de la teledetección'.)

Los usos de la teledetección en cuestiones asociadas con el fuego se pueden clasificar en tres grandes grupos: (a) los relacionados con la identificación, el relevamiento y la cuantificación de las áreas quemadas, (b) el estudio comparativo de la vegetación antes y después del fuego, y (c) el análisis de incendios de gran magnitud.

Incendio ocurrido el 19 de septiembre de 2006 entre las localidades de Los Cocos y Capilla del Monte, Córdoba.

Figura 1. Área boscosa incendiada en Los Cocos. Adviértase el contraste entre las áreas afectadas y no afectadas por el fuego.

Figura 2. Adviértase el efecto cortafuego de un camino vecinal.

Figura 3. Consecuencias del incendio en la propiedad Agua de los Palos, Capilla del Monte.

Figura 4. Vegetación arbustiva afectada por el fuego.

Figura 5. Adviértase el efecto del fuego sobre los bosques de altura.

Identificación, relevamiento y cuantificación de áreas quemadas

La detección de focos ígneos y áreas quemadas mediante sensores remotos es posible gracias a las diferencias de color y de radiación infrarroja que se constata entre extensiones que se están quemando o se hubiesen incendiado y aquellas cubiertas normalmente por vegetación. En palabras más técnicas, en las regiones del espectro electromagnético correspondientes a la luz visible y a los rayos infrarrojos, existen diferencias entre la radiación emitida por esas dos clases de

áreas, que pueden registrar sensores colocados en satélites en órbita terrestre.

Los fuegos, por su alta temperatura (entre 300 y 1000 °C), emiten abundante radiación en las longitudes de onda correspondientes al infrarrojo medio (3-5µm), y una significativa cantidad en las correspondientes al infrarrojo térmico (8-14µm). De esta manera, es posible detectar los focos de calor en el momento en que se produce el fuego, es decir, en tiempo real.

Con esa información, se puede producir cartografía que describa la situación diaria, mensual, estacional o anual de grandes superficies, de manera operativa y a un costo eco-

TELEDETECCIÓN SATELITAL

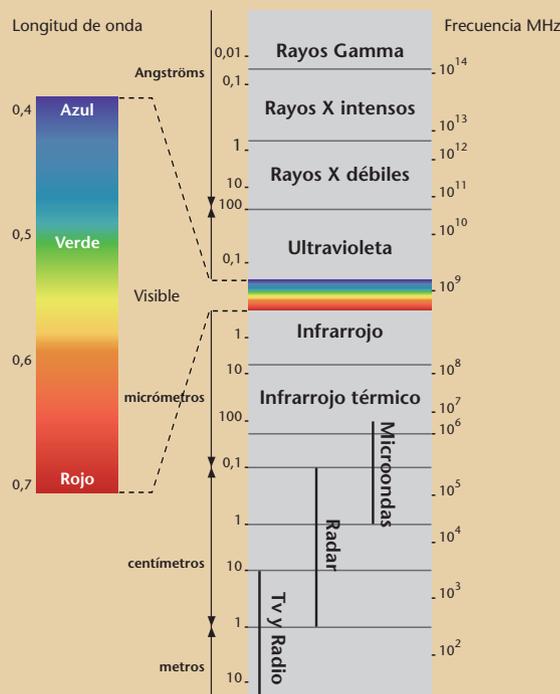
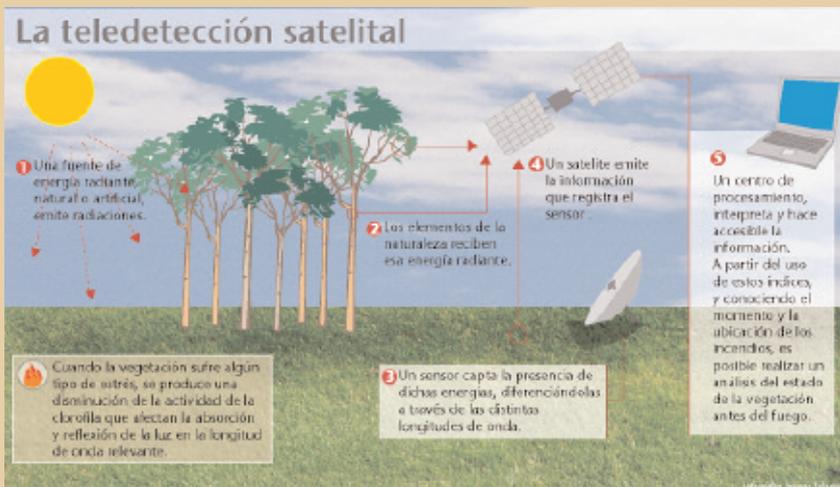
La teledetección satelital es la observación y registro de lo que sucede en la superficie de la Tierra mediante instrumentos colocados en satélites artificiales que giran en órbita alrededor del planeta.

En términos más generales, un sistema de teledetección consiste en: (A) una fuente de energía radiante, natural o artificial, de luz visible u otra radiación; (B) objetos que reciben esa energía radiante; (C) un sensor con la capacidad de registrar la presencia de dicha energía, según sus distintas longitudes de onda; (D) un mecanismo de transmisión de la información que registra el sensor a (E) un centro de procesamiento, que la procesa, interpreta y hace accesible a quienes la requieran para distintas aplicaciones.

En la teledetección satelital que trata esta nota, la principal fuente de energía es el Sol; los objetos de interés son los ecosistemas naturales o agropecuarios; los sensores van colocados en satélites en órbita; el mecanismo de transmisión es un enlace radial entre el satélite y una estación terrestre, y el centro de procesamiento está compuesto esencialmente de computadoras, como lo indica la figura 1.

Los sensores satelitales captan radiación correspondiente al espectro electromagnético (de ahí que se hable de información *espectral*) reflejada o emitida en diferentes longitudes de onda por la superficie terrestre, en especial, luz visible (0,4-0,7 micrones) y radiación en las zonas del infrarrojo cercano (0,7-1,3µm), infrarrojo medio (1,3-8µm) o infrarrojo térmico (8-14µm), según se aprecia en la figura 11.

La información registrada por los sensores puede tener distintas *resolución espacial* (unidad mínima de superficie para la que se integra la información espectral), *espectral* (número y ancho de las bandas), *radiométrica* (número de posibles valores que puede tomar cada dato), *temporal* (frecuencia con la que un sensor toma información de un mismo punto de la superficie) y *geométrica* (ángulo de observación). Por ejemplo, una imagen provista por el sensor TM del satélite Landsat tiene una resolución espacial de 30m, una resolución temporal de 16 días y 7 bandas espectrales (0,45-0,52/0,52-0,6/0,63-0,69/0,76-0,9/10,4-12,5/2,08-2,35/1,55-1,75). El sensor AVHRR del satélite NOAA tiene menor resolución espacial (1km), mayor resolución temporal (2 veces por día) y menor resolución espectral (0,58-0,68/0,72-1,1/10,5-11,3/3,55-3,93/11,5-12,5).



nómico insignificante. Así, utilizando los sensores de tipo AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) colocados en los satélites de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), o sensores MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) colocados en los satélites AQUA y TERRA de la NASA, se han generado mapas diarios de fuegos con una resolución espacial de 1 km².

Teniendo en cuenta que, desde la década de 1980, existieron satélites en órbita con sensores capaces de registrar radiación emitida por los fuegos, no sorprende que dispongamos en la actualidad de información suficiente como para poder definir patrones espaciales y temporales de la ocurrencia de fuegos, y para estudiar los factores que influyen en su variación, como el clima, los tipos de vegetación o determinadas variables socioeconómicas.

Por ejemplo, en un trabajo en el que participó uno de los autores de esta nota, publicado en 2006 en la revista *Global Ecology and Biogeography*, se describieron los patrones temporales, anuales y estacionales de los fuegos de Sudamérica, y se estudiaron los factores abióticos, bióticos y antrópicos que intervinieron en los incendios. Los resultados obtenidos sugieren que el déficit hídrico explica la mayor parte de las variaciones encontradas en la densidad de fuegos de las distintas regiones. Se observó, además, que la agricultura aumentó la densidad de incendios en ambientes relativamente húmedos, donde normalmente no hay condiciones que favorezcan su ocurrencia (por ejemplo, por el uso del fuego para desmontar tierras con selvas tropicales y subtropicales); mientras que las actividades humanas significaron una disminución de los fuegos en ambientes semiáridos, donde el clima y la vegetación configuran condiciones favorables a que se produzcan (por ejemplo, por la difusión del riego en zonas semiáridas).

El mencionado trabajo, que examinó diariamente, por dos años, una superficie total de unos 13,7 millones de kilómetros cuadrados, abarcó once ecosistemas característicos de la región y 74 unidades administrativas (provincias, estados, regiones o provincias) en la Argentina, Brasil, Chile y Paraguay. Fue posible no solo debido a la existencia de datos satelitales (difíciles de obtener, en esa escala, con otros medios) sino, también, por la posibilidad que brindan los sistemas de información geográfica de procesar e interrelacionar enormes volúmenes de información con precisa referencia al lugar geográfico al que corresponden (*o información georreferenciada*).

Producido un incendio, es importante poder medir el área quemada, tanto por sus implicancias ambientales, como económicas o sociales. En tal sentido, los sensores remotos resultan también en una herramienta muy valiosa, en términos de eficiencia y costos, para brindar datos globales de muy alta confiabilidad y precisión.

Son notables los avances que han tenido lugar en materia de cartografía de áreas quemadas. Por ejemplo en el proyecto AQL (Área Quemada en Latinoamérica),

APLICACIONES DE LA TELEDETECCIÓN

Meteorología



Heladas, huracanes, granizo, inundaciones, previsión meteorológica

Agronomía



Estimación de productividad, seguimiento de cultivos, delimitación de ambiente de manejo diferencial

Geología



Estudio de la corteza terrestre, sus estructuras, sus cambios y sus aplicaciones mineras. Estudio de aguas y plataformas marinas

Hidrología



Manejo integrado de cuencas y recursos hídricos, zonas anegables y sistemas de riego

Ambiente



Estudio de riesgo de ocurrencia de desastres naturales, análisis de las coberturas vegetales

de la RedLaTIF (Red Latinoamericana de Teledetección e Incendios Forestales, coordinada por el departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá de Henares y parte del llamado GOFD-GOLD o *Global Observation for Forest and Land Cover Dynamics*), se pudieron obtener mapas mensuales de áreas quemadas del área continental americana entre México y la Patagonia usando información obtenida por sensores MODIS.

Estudio de la vegetación antes y después del fuego

Los tejidos vegetales en óptimas condiciones de crecimiento se caracterizan por una muy alta absorción de energía en las longitudes de onda del espectro visible (que les sirve para realizar la fotosíntesis) y una muy alta reflexión en la porción correspondiente al infrarrojo cercano (debido principalmente a la dispersión producida por el tejido de las hojas). En consecuencia, si se fotografía alternativamente plantas verdes con películas sensibles a la radiación visible (las películas corrientes) y a la radiación infrarroja, sus hojas aparecen relativamente oscuras en las fotografías corrientes y relativamente cla-

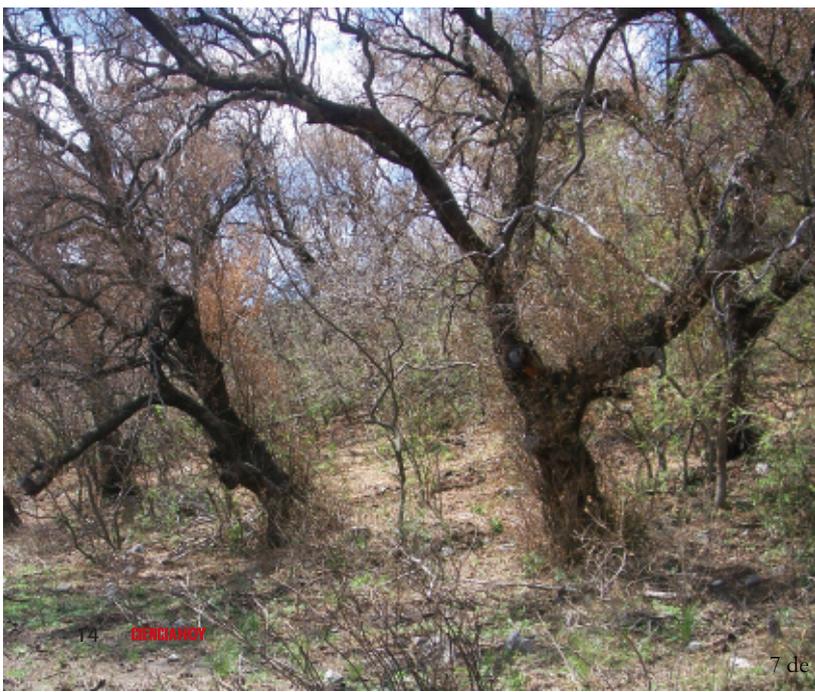
ras en las fotografías infrarrojas (a diferencia de las fotos de, por ejemplo, nubes, en la que pasa lo inverso).

Cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, como insuficiencia de agua, se produce una disminución de la actividad de la clorofila o una alteración de la estructura de los tejidos de las hojas, que afectan la absorción y reflexión de la luz en la longitudes de onda relevantes. De esta manera es posible estimar el estado hídrico de la vegetación o la combustibilidad de los tejidos vegetales. Por ejemplo, el índice de vegetación denominado NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), calculado a partir de combinar información de las bandas espectrales del rojo e infrarrojo cercano, resulta un buen estimador del área foliar y de la productividad primaria de la vegetación.

Figura 6. Biomasa acumulada en el área de Los Cocos, Córdoba. La cantidad de vegetación constituye un factor de riesgo de fuego.



Figura 7. Bosque seco en zona de pendiente en Los Cocos, Córdoba. La sequedad de la vegetación constituye un factor de riesgo de fuego.



ción. Asimismo, la evolución en el tiempo de ese índice permite detectar deficiencias de agua en la vegetación y así estimar su combustibilidad.

A partir del uso de estos índices, y conociendo el momento y la ubicación de los incendios, es posible realizar un análisis del estado de la vegetación antes del fuego. Como resultado de tal análisis se puede determinar qué características de la cobertura vegetal favorecen la ocurrencia de los incendios y su propagación, y cuáles están relacionadas con su duración e intensidad.

Investigaciones que se llevan a cabo actualmente en el Instituto de Clima y Agua del INTA Castelar demuestran que las características preexistentes de la vegetación son diferentes en sitios que se incendiaron de aquellas de los lugares en que no se produjo fuego. Las condiciones previas encontradas en sitios en que hubo fuego no son necesariamente determinantes de que este se hubiese producido, pero pueden incrementar el peligro de incendio.

En dicha institución se llevan también a cabo estudios para diferenciar las condiciones previas de la vegetación de sitios afectados por incendios de pequeña y de gran magnitud, de rápida o lenta propagación, breves o prolongados, y débiles o intensos. Los resultados preliminares muestran que existen ciertos tipos de vegetación más propensos a padecer los incendios más extensos y de mayor duración. El estado y la cantidad de combustible vegetal también son factores determinantes de la peligrosidad de los incendios. Las figuras 6 y 7 ilustran sobre dos factores de riesgo para la ocurrencia de incendios.

Contando con todos esos datos, es posible diseñar programas regionales de prevención y detección temprana, lo mismo que predecir cómo se recuperarán los distintos tipos de vegetación de los sitios quemados con el transcurso del tiempo. La severidad del incendio, entendida como el daño ocasionado por el fuego a la vegetación, influye en forma marcada sobre el tiempo y la capacidad de recuperación de las plantas. A mayor daño, menor actividad fotosintética posterior y mayor el tiempo que toma la regeneración de las plantas después del fuego.

Los autores de este artículo observaron que, en la Argentina, la vegetación de arbustos y pastizales abiertos (figura 8) se recupera mejor, mientras que los bosques caducos y húmedos no alcanzan a recuperarse en un período de unos 35 meses. Los valores más altos de recuperación se asocian con especies herbáceas y leñosas finas, que tienen mayor capacidad de germinación y rebrote. Los niveles más bajos corresponden a coberturas leñosas, lo cual puede deberse no solo a su lenta tasa de crecimiento sino, también, al daño ocasionado por el fuego a los árboles.

La información obtenida por teledetección debe ser integrada con otra registrada en los sitios, de modo de poder ajustar la observación remota a la realidad del terreno. Para ello se han diseñado protocolos que permiten caracterizar de manera uniforme tanto los incendios como el ambiente



Figura 8. Pastizales no afectados por el incendio, en la localidad de Los Cocos, Provincia de Córdoba.

afectado, y correlacionar esos datos con la información espectral captada por los sensores remotos. Como resultado, es posible extrapolar información a amplias regiones de difícil o imposible acceso, y obtener a costos reducidos detalles de los incendios que otras herramientas no podrían proporcionar con el mismo nivel de precisión.

Prevención de grandes incendios

Uno de los temas de mayor preocupación para los organismos públicos que se ocupan del ambiente y los recursos naturales es la prevención de grandes incendios. Tales instituciones generalmente se interrogan sobre sus capacidades humanas y tecnológicas para establecer programas de alertas tempranas, orientadas a evitar el deterioro ambiental y las pérdidas socioeconómicas asociadas.

Dado que los incendios son fenómenos altamente variables en el tiempo y el espacio, los sistemas de información geográfica resultan en una herramienta poderosa para integrar información aportada por la teledetección y otras fuentes. De esa forma se construyen modelos de peligrosidad de incendios, utilizando y combinando, entre otras, variables meteorológicas y espectrales, con las que es posible realizar análisis regionales que contemplen tanto la dimensión espacial (por ejemplo, que tengan en cuenta las características del terreno) como la temporal (que consideren la dinámica de los fuegos). Sumado a ello, las tecnologías actuales de comunicación permiten poner los resultados a disposición de quienes los necesiten en forma instantánea, una vez procesados los datos.

Un modelo de peligrosidad de incendios debe contener, por lo menos, información sobre tipos de vegetación (bosques, pastizales, arbustos), características del terreno (altura, pendientes, exposición al sol), presencia de zonas urbanas, accesibilidad y contenido hídrico de la vegetación. Para determinar la probabilidad de propagación de fuego, los modelos asignan una importancia relativa a cada una de estas variables, lo que lleva a rea-

lizar un análisis más preciso y detallado de aquellas variables con mayor efecto sobre la peligrosidad (por ejemplo la cantidad de vegetación seca acumulada, que resulta altamente inflamable). Una aproximación de este tipo permite definir las zonas con mayor riesgo de sufrir grandes incendios, y movilizar en consecuencia los recursos para su supresión y combate.

Los trabajos del grupo de investigación que integran los autores reciben apoyo económico del Inter-American Institute for Global Change Research, el INTA y la SECyT. Las fotografías que ilustran la nota fueron tomadas por Nicolás Mari y Jon Ander Kanpandegi.

LECTURAS SUGERIDAS

DI BELLA CM, JOBBÁGY EG, PARUELO JM y PINNOCK S, 2006, 'Fire density controls in South America', *Global Ecology and Biogeography*, 15, 2:192-199.

GIGLIO L, VAN DER WERF G, RANDERSON J, COLLATZ G y KASIBHATLA P, 2006, 'Global estimation of burned area using active fire observations', *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6:957-974.

MARI NA, KANPANDEGI JA, DI BELLA C, FISCHER MA y FERRER F, 2007, 'Respuesta espectral de la vegetación quemada para distintos ecosistemas de la Argentina', en **RIVAS R, GRISOTTO A y SÁCIDO M** (eds.), *Documentos de XII congreso de la Asociación Española de Teledetección*, Mar del Plata, pp.237-243.

Proyecto AQL (Área Quemada en Latinoamérica):

<http://www.geogra.uah.es/aql/>.

Proyecto GOF-C-GOLD (*Global Observation for Forest and Land Cover Dynamics*): <http://gofc-fire.umd.edu/Spanish/index.asp>.

Datos de los autores



Carlos M Di Bella

Doctor en ciencias, Institut National Agronomique, Paris-Grignon.

Ingeniero agrónomo, Facultad de Agronomía (UBA). Investigador en el Instituto de Clima y Agua, INTA Castelar.

Investigador asistente del CONICET

cdibella@cnia.inta.gov.ar



María de los Ángeles Fischer

Candidata a magíster en recursos naturales, Escuela para Graduados Alberto Soriano, Facultad de Agronomía (UBA).

Ingeniera agrónoma, Universidad de Morón. Becaria en el Instituto de Clima y Agua, INTA Castelar. afischer@cnia.inta.gov.ar



Nicolás A Mari

Licenciado en gerenciamiento ambiental, Universidad de Ciencias Empresariales y Sociales.

Investigador en el Instituto de Clima y Agua, INTA Castelar.

nmari@cnia.inya.gov.ar