

# Modelo de zonificación

## Agroclimática para la producción de sorgo dulce con fines energéticos en Argentina

Agroclimatic zoning model for sweet sorghum production for energy purposes in Argentina

### Silvia Liliana Falasca

CONICET. Instituto Clima y Agua. INTA, Universidad Nacional del Centro (UNICEN). Facultad de Ciencias Humanas, Tandil, Provincia de Buenos Aires, Argentina  
sfalasca@conicet.gov.ar; slfalasca@gmail.com

### María Angélica Bernabé

Universidad Nacional del Centro (UNICEN), Facultad de Ciencias Humanas, Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales (CINEA). Tandil, Provincia de Buenos Aires, Argentina  
mbernabe@fch.unicen.edu.ar; mariangeberna@gmail.com

### Resumen

El sorgo dulce es considerado uno de los cultivos más eficientes para convertir CO<sub>2</sub> atmosférico en azúcar. El objetivo de este trabajo fue delimitar el área agroclimáticamente apta para el desarrollo del sorgo dulce en Argentina, como potencial especie productora de bioetanol, utilizando los límites biofísicos observados en el país y en otros lugares en el mundo donde se cultiva la especie. Para definir la aptitud agroclimática, se analizaron datos meteorológicos (1981-2010). Además, se utilizó una serie de variables bioclimáticas previamente interpoladas para obtener los mapas. Los índices agroclimáticos, que determinan las diferentes clases de aptitud, se integraron en un sistema de información geográfico para crear regiones térmicas e hídricas. Los mapas elaborados se superpusieron para obtener la zonificación agroclimática. Se delimitaron diez clases de aptitud agroclimática, bajo el que se diseñó un modelo de zonificación agroclimática para el sorgo dulce en Argentina. Este modelo se puede aplicar en cualquier parte del mundo utilizando los límites agroclimáticos presentados en este trabajo.

**Palabras clave:** sorgo dulce; necesidades bioclimáticas; aptitud agroclimática; bioetanol.

### Abstract

*Sorghum bicolor var. sweet is considered to be one of the most efficient crops to convert atmospheric CO<sub>2</sub> into sugar. The aim of this study was to delimit the Argentina agroclimatic suitable area for the development of Sweet sorghum as a potential bioethanol-producing species, by using biophysical limits observed in the country and elsewhere in the world where the plant is grown. To define its agroclimatic suitability, the meteorological data (1981-2010) were analyzed. To obtain the maps, a series of previously interpolated bioclimatic variables were used. The agroclimatic indices, which determine different classes of suitability, were integrated in a geographic information system to create thermal and moisture regions. The maps elaborated were overlapped to determine the agroclimatic zoning. Ten types of agroclimatic suitability were delineated. The authors outlined an agro-climatic zoning model for sweet sorghum in Argentina. This model may be applied in any part of the world, by using the agroclimatic limits presented in this paper.*

**Key words:** sweet sorghum; bioclimatic requirements; agroclimatic suitability; Argentina; bioethanol.

## 1. Introducción

Con la entrada en vigencia de la Ley N° 26.093 (2006), la producción de biocombustibles en Argentina, más precisamente el biodiesel que se elabora a partir del aceite de soja, tuvo un gran impulso y generó considerables saldos exportables. El consumo de biocombustibles se reguló a partir del 1 de enero de 2010 y desde entonces, el diesel comenzó a cortarse con un 5 % de biodiesel y las naftas con un 5 % de alcohol anhidro.

Mientras la economía y las industrias se fueron expandiendo, el consumo de combustible se fue acrecentando y en un determinado momento, el consumo comenzó a superar la producción, provocando que Argentina tuviera que importar combustibles fósiles para satisfacer las demandas industriales y residenciales. Pese a que la energía es uno de los principales temas del debate político-económico nacional, el desabastecimiento energético en el país se remonta a más de una década.

Las importaciones argentinas de energía aumentan año tras año, a pesar de las últimas medidas oficiales que recortaron los subsidios destinados a este sector. En el último año, la Argentina duplicó la importación de nafta y gasoil, cuyas compras al extranjero crecieron 72 % en 2014, en comparación al mismo mes del año anterior (El cronista, 2014).

La Secretaría de Energía de la Nación sancionó en 2014 una importante resolución para la industria de los biocombustibles, que tiende a posibilitar un corte obligatorio de las naftas con 10 % de bioetanol a partir del 1° de diciembre de 2014. La Resolución N° 44/2014 (que modifica la Resolución N° 1294/2008 y se refiere a la elevación del porcentaje de corte de las naf-

tas) tendrá impacto en la producción nacional y la demanda interna de maíz y caña de azúcar. El objetivo central de la decisión gubernamental de ampliar el porcentaje de corte con bioetanol apunta a disminuir la dependencia con el exterior y reforzar el autoabastecimiento.

En Argentina el mercado doméstico de bioetanol es pequeño con respecto al de biodiesel, tanto en lo que respecta a la producción como al consumo, el que oscila en los ocho millones de metros cúbicos. Como consecuencia de esta última resolución, se emplearán aproximadamente 800.000 metros cúbicos de bioetanol para mezclar con las naftas.

Los proyectos de bioenergía, como promueven el desarrollo de nuevas plantaciones energéticas, generalmente de ciclo corto, y como reducen las emisiones de carbono por la sustitución de combustibles fósiles, ejercen un doble efecto sobre la mitigación del cambio climático. En los últimos años ha crecido el interés en diversos países por la utilización del sorgo dulce como fuente de bioenergía, ya que esta especie presenta altos contenidos de biomasa y produce azúcar soluble convertible en bioetanol, mientras que las fibras residuales del proceso de extracción del jugo se pueden emplear para generar electricidad.

El objetivo de este trabajo consistió en delimitar el área agroclimáticamente apta para el desarrollo del sorgo dulce en Argentina, como potencial especie productora de bioetanol, utilizando los límites biofísicos observados en el país y en otros lugares en el mundo donde se cultiva la especie.

### 1.1 Características del sorgo

El sorgo, *Sorghum bicolor* (L.) Moench, pertenece a la familia de las gramíneas. Se trata de una especie con metabolismo C<sub>4</sub> y de crecimiento primavera-verano (Dendy, 1995).

Fue domesticado por primera vez en África (Etiopía). El terreno montañoso y la diversidad de climas en esta zona dieron lugar a un gran número de genotipos, adaptados a una amplia variedad de condiciones ambientales. Si bien existe un gran número de variedades de sorgo, para bioenergía interesan los biotipos dulce y de alta biomasa. Estos últimos son híbridos de floración tardía con una prolongada etapa vegetativa, lo cual permite el retraso en el desarrollo de estructuras reproductivas para alcanzar hasta seis metros de altura (Blade, 2012), produciendo altos rendimientos de biomasa fibrosa, para bioetanol de segunda generación.

### 1.2 Usos y productividad

Desde el punto de vista energético el sorgo es útil para: a) producción de bioetanol: mediante la extracción y procesamiento de los azúcares contenidos en el tallo de la planta, que pueden representar más de 40 % del tallo seco, obteniéndose en promedio 0,14 litros de etanol a partir de un kg de sorgo dulce; b) producción térmica o eléctrica: el uso de la biomasa seca producida que sirve para la producción de calor o electricidad.

Un sorgo alcoholero de alta eficiencia debería tener niveles de producción que superen las 45 toneladas por hectárea de tallo libre, tallo jugoso con fibras intermedias, altos valores de fermentables en jugo, un período de cosecha amplio, tallos de altura de no menos de 3 metros, baja incidencia

del porcentaje de panoja y buena tolerancia al vuelco para que no se corte su maduración. Esta última condición es aplicable a variedades graníferas, cuyo almidón puede convertirse a bioetanol de primera generación. El bagazo puede transformarse en bioetanol de segunda generación o con fines termoeléctricos, del mismo modo que se realiza con la caña de azúcar; es decir, que el sorgo dulce puede utilizarse para la producción de biocombustibles de primera y segunda generación al mismo tiempo. La producción de azúcar puede alcanzar las 9 t ha<sup>-1</sup> y 30 t MS de paja. Dependiendo de las zonas, se pueden obtener de 3 a 6 mil l ha<sup>-1</sup> de bioetanol (De Juana y Fernández, 2002; Camps y Marcos, 2008; San Miguel, 2008).

El bioetanol a partir de sorgo azucarado, producido con eficiencia y sostenibilidad, es capaz de satisfacer las demandas urgentes de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la calidad del aire y competir en precio con las energías convencionales (Cárdenas *et al.*, 2007). La cosecha se hace al inicio de la floración, impidiendo así la formación de grano: la primera entre los 60 y 80 días a partir de la siembra, la segunda y tercera, entre los 40 y 50 días después de la primera y segunda (Romero *et al.*, 2010).

Los tallos maduros contienen alrededor de 73 % de humedad. El jugo que se obtiene de ellos está compuesto básicamente por sacarosa, glucosa y fructosa, en proporciones que dependen de la variedad, temporada de cosecha y etapa de madurez (Mamma *et al.*, 1996).

De acuerdo a Woods (2000), en promedio un 15 % del peso del tallo corresponde a la porción fibrosa (hemicelulosa, celulosa y lignina). Si se analiza el bagazo de sorgo

dulce o el residuo que se obtiene después de extraer el jugo azucarado, los rangos de celulosa, hemicelulosa y lignina oscilan de 34–44 %, 25–27 % y 18–20 %, respectivamente (Ballesteros *et al.*, 2003).

### 1.3 Requerimientos edafoclimáticos

Habita sitios con climas Aw (sabana tropical), BW (desierto o árido), BS (estepa o semiárido) y Cf (subtropical húmedo), cuya temperatura media anual oscila de 7,8 a 27,8 °C (Duke, 1983).

El umbral de temperatura mínima para la germinación es de 10 °C, siendo el rango óptimo de 21 a 35 °C (Peacock, 1982). La temperatura óptima de crecimiento vegetativo oscila entre 27 y 35 °C (FAO-Ecocrop, 2004) mientras que la temperatura mínima de crecimiento es de 15,6 °C. Temperaturas superiores a 39 °C pueden resultar dañinas (Iglesias y Taha, 2010). La temperatura base para el subperíodo siembra-floración está entre 12,7 y 15,2 °C para genotipos de origen templado, y entre 14,6 y 15,7 °C para genotipos de origen tropical (Ruiz y Soltero, 1993). La temperatura óptima para el desarrollo fluctúa de 22 a 35 °C, aunque el rango de tolerancia abarca de 8 a 40 °C (FAO-Ecocrop, 2004). La estación de crecimiento para esta especie comienza y se mantiene mientras la temperatura media diaria sea igual o superior a 18 °C (Neild, 1982).

Es una especie de día corto (< 12 horas), aunque hay cultivares de día neutro (Dendy, 1995). La formación de la panoja y la floración se aceleran en días cortos y se retrasan en días largos (Baradas, 1994). Esto es especialmente importante para variedades graníferas.

Si bien puede habitar sitios que reciben de 250 a 700 mm, la óptima necesidad de agua oscila de 400 a 600 mm/ciclo, siendo la etapa más crítica la del llenado de grano. Según FAO-Ecocrop (2004), el óptimo de lluvia oscila de 600 a 1.000 mm anuales, siendo los límites extremos 300 y 3.000 mm.

Tiene alta tolerancia a la sequía y a ciertos periodos de encharcamiento, además de capacidad para detener el crecimiento frente a una sequía y reanudarlo después de ésta. Una sequía tardía puede detener el desarrollo de la hoja pero no la iniciación floral (Whiteman y Wilson, 1965).

Normalmente, cuando el sorgo está plenamente desarrollado, el 100 % del agua consumida se extrae de la primera capa del suelo (1 a 2 m). En condiciones en que la evapotranspiración máxima es de 5 a 6 mm/día, habiéndose agotado alrededor del 55 % del agua total disponible en el suelo, no reduce la absorción de agua (Doorenbos y Kassam, 1979).

Prefiere suelos profundos de texturas medias y con buen drenaje (Doorenbos y Kassam 1979). Su rango de pH oscila de 5,0 a 8,5, con un óptimo alrededor de 7,0 (FAO, 1994). Se desarrolla bien en suelos alcalinos, especialmente las variedades azucaradas que requieren carbonato cálcico para aumentar su contenido en sacarosa en tallos y hojas. Es considerado un cultivo moderadamente tolerante a la salinidad del suelo. Doorenbos y Kassam (1979) afirman que la merma de rendimiento por la salinidad del suelo bajo riego es: 10 % para una conductividad eléctrica de 5.1 mmhos cm<sup>-1</sup>, 25 % para 7,2 mmhos cm<sup>-1</sup>, 50 % para 11 mmhos cm<sup>-1</sup> y 100 % para 18 mmhos cm<sup>-1</sup>.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Área de estudio

El área de estudio es la República Argentina que cuenta con una superficie total de 3.761.274 km<sup>2</sup>. Por el norte limita con el Estado Plurinacional de Bolivia, la República del Paraguay y la República Federativa del Brasil, por el sur con la República de Chile y el océano Atlántico Sur, por el este con la República Federativa del Brasil, República Oriental del Uruguay y el océano Atlántico Sur, mientras que por el oeste limita con la República de Chile.

El punto septentrional es la confluencia de los ríos Grande de San Juan y Mojinete, en la provincia de Jujuy (21°46' S; 66°13' O). El punto meridional es el Cabo San Pío (55° 03' S; Longitud 66°31' O). El extremo este corresponde a la localidad de Bernardo de Irigoyen, en la provincia de Misiones (26°15' S; 53°38' O), mientras que el extremo oeste representa un punto ubicado en el Parque Nacional Los Glaciares, provincia de Santa Cruz (50°01'S; 73°34' O).

### 2.2 La zonificación agroclimática

Conociendo las necesidades bioclimáticas del *Sorghum bicolor*, con base en toda la bibliografía citada en el apartado anterior, se procedió a elaborar un modelo de zonificación agroclimática empleando datos climáticos correspondientes al período 1981-2010 de las estaciones meteorológicas y agrometeorológicas presentes en Argentina.

Para definir las regiones térmicas, en una primera instancia se tuvo en cuenta la isoterma de 8 °C correspondiente a la temperatura media anual; luego se consideró la temperatura media del semestre cálido

(octubre a marzo) que debe ser igual o superior a 18 °C mientras que la temperatura media de verano (diciembre a marzo) debe superar los 22 °C si el objetivo es producir el grano, siendo 18 °C el límite si se busca un tallo sucro-alcoholero.

Además, resulta indispensable contar con un período libre de heladas superior a los 150 días, lo que garantiza el período de crecimiento de la especie. En caso de no contar con esos días libres de heladas, califica como área no apropiada.

Debido a que el crecimiento de sorgo dulce se detiene cuando la temperatura es superior a 39 °C, se consideró la probabilidad de que ocurran temperaturas máximas absolutas de 39 °C o superiores. Las áreas que presentan esta condición están indicando un grado de limitación por temperaturas muy elevadas.

Para analizar las regiones hídricas, se tuvieron en cuenta las isoyetas correspondientes a los 250, 450, 600 y 1.000 mm anuales, calificando como área no apropiada aquella que no alcanza el umbral mínimo de los 250 mm, área marginal cuando se reciben de 250 a 450 mm y área apropiada en el rango de 450 a 600 mm. El rango de 600 a 1.000 mm anuales representa el óptimo de lluvia mientras que precipitaciones superiores a 1.000 mm delimitan otra zona apropiada.

Si se reciben menos de 250 mm, pero se cumplen las otras necesidades bioclimáticas, podría implementarse el riego complementario y aumentar el área agroclimáticamente apta, pero como se trata de un cultivo extensivo con fines energéticos, no resulta recomendable el uso del riego complementario.

La superposición de los mapas anteriores permitió definir las clases de aptitud agroclimática para el cultivo del sorgo dulce en Argentina. Los límites de cada clase de aptitud se presentan en el **cuadro 1**.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Regiones térmicas

Se agregó como **figura 1** la división política de Argentina con la nomenclatura de las provincias a los fines de que lectores no residentes en el país puedan interpretar mejor los resultados.

Las isotermas medias anuales permiten dividir al país en tres grandes áreas térmicas: tropical, donde la temperatura media anual supera los 20 °C; templado, entre las

isotermas de 20 °C y de 10 °C y por último, frío, donde la temperatura media anual es inferior a los 10 °C.

En la **figura 2** se presenta la temperatura media anual >8 °C. El área delimitada como apropiada para el sorgo dulce, incluye clima templado y tropical. En dicha figura se puede apreciar que no existen limitaciones para el sorgo en Argentina por temperatura media anual, ya que hasta en el NE de la provincia de Santa Cruz se registran temperaturas medias anuales superiores a 8 °C.

En la **figura 3** se muestra la temperatura media del semestre cálido superior a 18 °C. De la misma se infiere que la mayor parte del país presenta aptitud apropiada. Las áreas no apropiadas cubren el noroeste argentino y gran parte de la Patagonia

**Cuadro 1.** Clases de aptitud agroclimática definidas para el sorgo dulce.

Fuente: elaboración propia

Clase de aptitud agroclimática	Temperatura media anual (°C)	Temperatura media semestre cálido (°C)	Temperatura media de verano (°C)	Periodo libre de heladas (días)	Precipitación anual (mm)
Muy apropiada (húmedo)	> 8	> 18	25-27	> 150	> 1.000
Apropiada (húmedo)	> 8	> 18	22-25	> 150	> 1.000
Óptima (subh-húmedo)	> 8	> 18	25-27	> 150	600-1.000
Muy apropiada (subh-húmedo)	> 8	> 18	22-25	> 150	600-1.000
Apropiada (subh-húmedo)	> 8	> 18	18-22	> 150	600-1.000
Muy apropiada (subh-seco)	> 8	> 18	22-25	> 150	450-600
Apropiada (subh-seco)	> 8	> 18	18-22	> 150	450-600
Apropiada con limitación térmica estival	> 8	> 18	< 18	> 150	450-600
Marginal	> 8	> 18	18-22	> 150	250-450
No apropiada	< 8	< 18	< 18	< 150	< 250

(sudoeste de Neuquén, oeste de Chubut y la totalidad de las provincias de Santa Cruz y Tierra del Fuego).

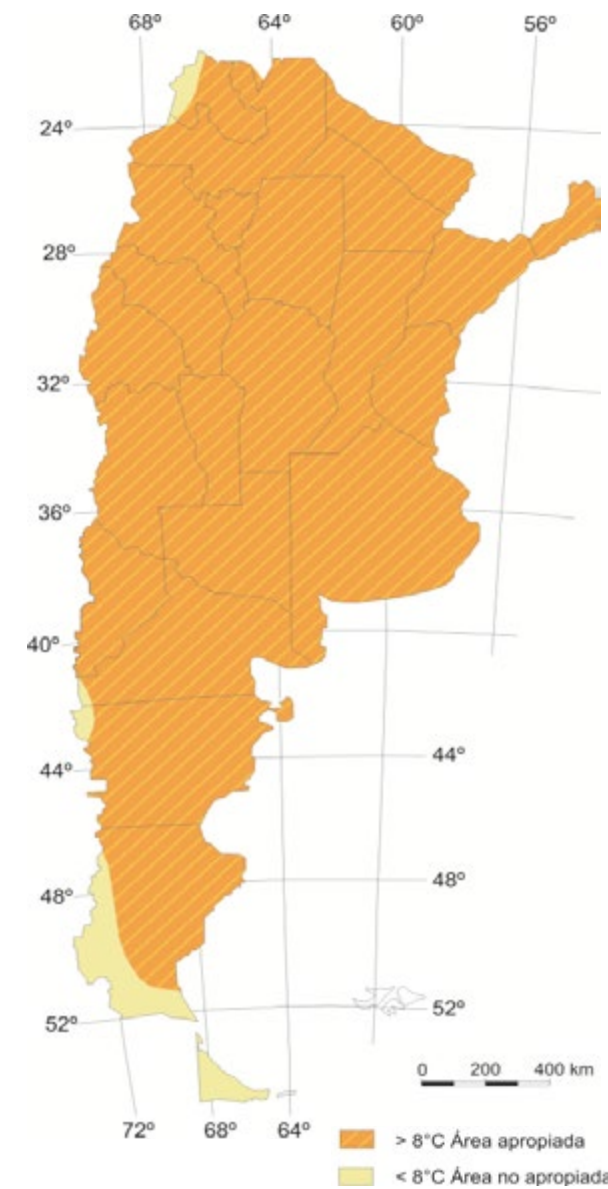
En la **figura 4** se presenta la temperatura media de verano, donde se distinguieron 4 zonas bien diferenciadas. El área no apropiada muestra una temperatura media

de verano inferior a 18 °C. Las áreas apropiadas registran temperaturas en el rango de 18 a 22 °C, las muy apropiadas de 22 a 25 °C mientras que las áreas óptimas, de 25 a 27 °C.

Las isotermas en la zona de llanuras siguen el recorrido de los paralelos terres-



**Figura 1.** División política de Argentina



**Figura 2.** Temperatura media anual

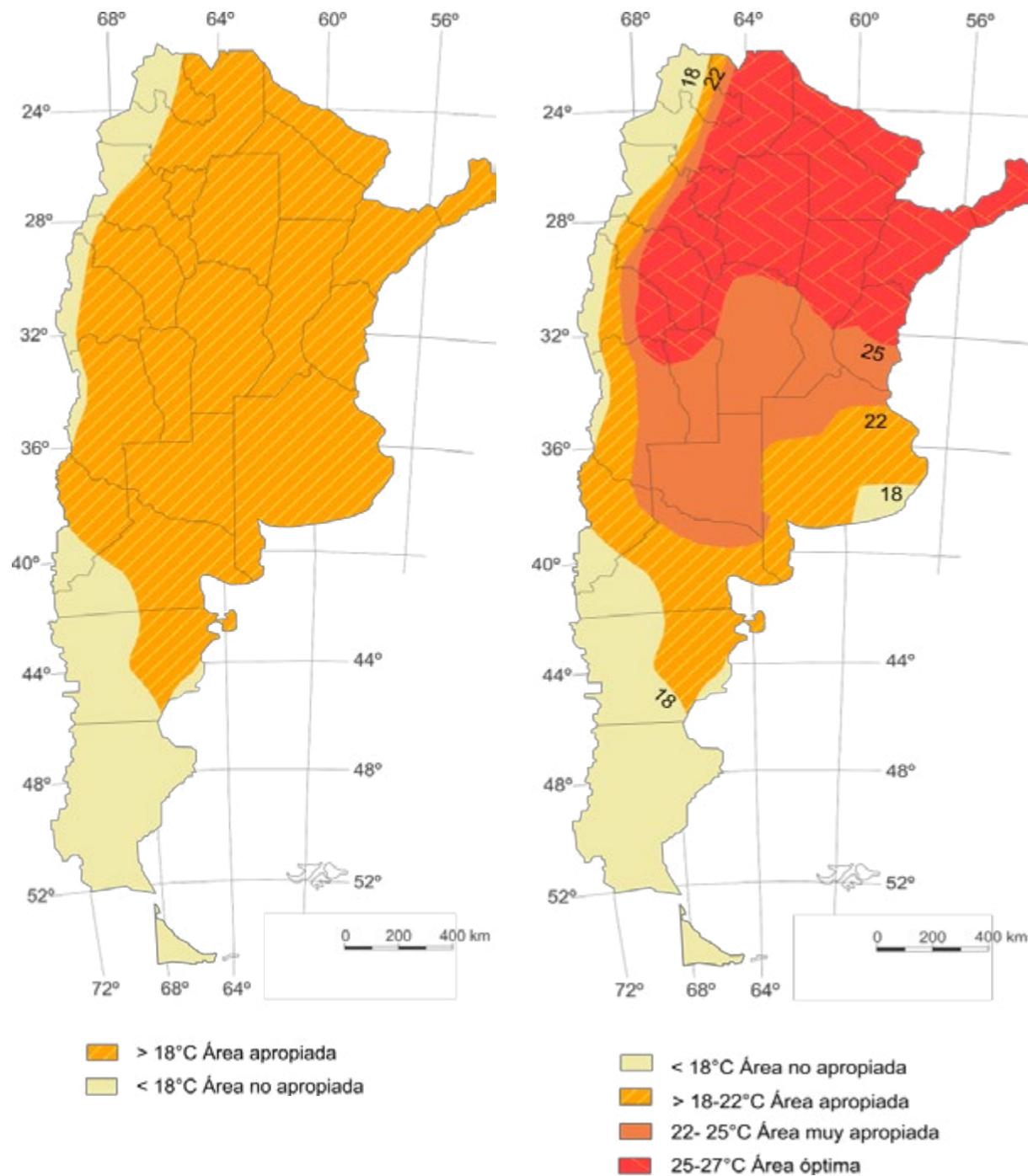


Figura 3. Temperatura media semestre cálido

Figura 4. Temperatura media verano

tres, desde el este al oeste y bien espaciadas entre sí. Al llegar a la cordillera de los Andes sufren una inflexión hacia el norte, debido al factor altitud, muy notorio en las isotermas de 18 °C, 22 °C y 25 °C. Otras inflexiones se aprecian debido a la presencia de serranías: sierras Pampeanas en el centro del país, que desvía hacia el N la isoterma de 25 °C, mientras que las sierras de Tandilia y Ventania, en la provincia de Buenos Aires, desvían la isoterma de 22 °C. El sur de la provincia de Buenos Aires goza de un clima más fresco en verano que el resto de la provincia por el efecto de oceanidad, y debido a la influencia de la corriente fría de Las Malvinas. En el centro de la provincia actúa el factor de altitud, aumentando la amplitud térmica diaria.

La figura 5 muestra la zona del país que registra una temperatura máxima absoluta > 39 °C con un período de recurrencia de 4 cada cinco años. El llamado Viento Norte es el que genera las temperaturas máximas y la advección de aire cálido penetra en el país tanto más al sur cuanto más avanzada está la estación estival. El sorgo es altamente sensible a la ocurrencia de temperaturas extremas en distintas etapas de su crecimiento, afectando de esta forma su rendimiento. Las áreas del país que presentan limitaciones por temperaturas máximas extremas > 39 °C cubren parte de las provincias del Chaco, Formosa, Salta, Santiago del Estero, La Rioja, Catamarca y San Juan. Los años en que se registren temperaturas > 39 °C significarán una merma en los rendimientos del sorgo azucarado en esas zonas.

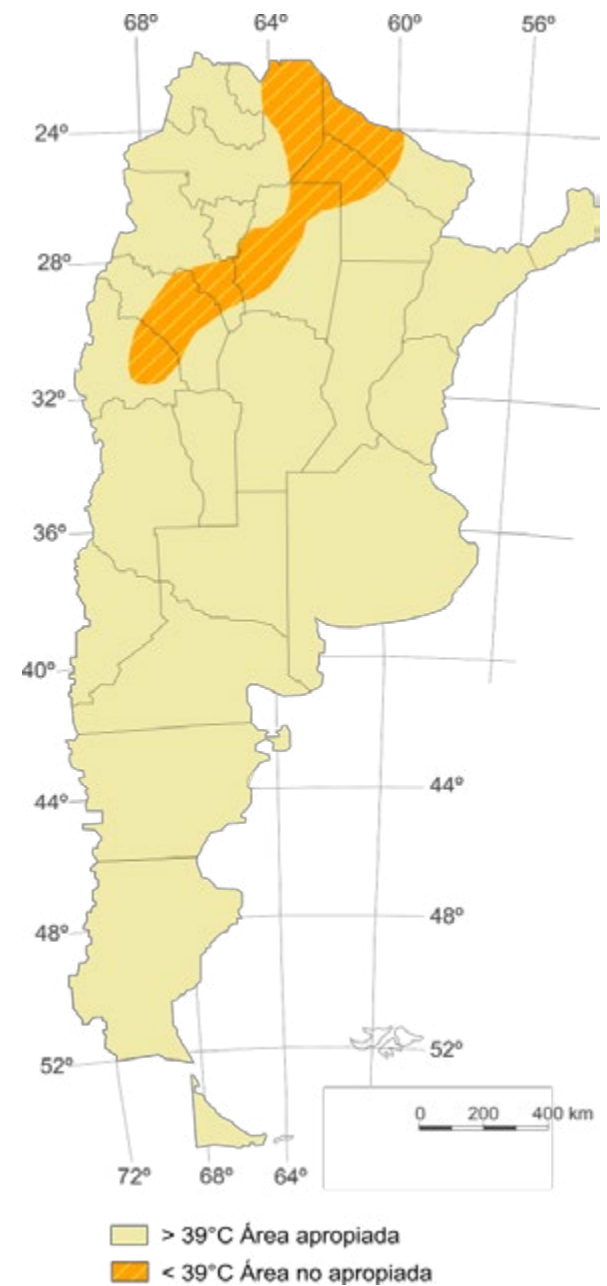


Figura 5. Temperatura máxima absoluta &gt; 39 °C (p: 80 %)

### 3.2 Período medio libre de heladas de heladas

Cada año la ocurrencia de la primera helada (otoño) y de la última helada (primavera) causa daños a los cultivos en diferentes regiones climáticas. La información sobre las fechas probables, de días libres de heladas ayuda a los agricultores a reducir los daños causados por ellas. En Argentina hay una gran dispersión de las fechas medias de primera y última helada (aproximadamente 30 días). Esto significa que la primera o última helada puede ocurrir 30 días antes o después de la fecha media. Esta variación se debe al efecto combinado de la gran variabilidad asincrónica de la temperatura y la tensión térmica escasa en el momento en que se producen las heladas. Esto sucede por la facilidad de la entrada de masas de aire polar en la dirección Sur-Norte y la poca amplitud térmica anual, ya que Argentina se encuentra bajo la influencia marítima. El valor máximo de días libres de heladas es de 360 días en el noreste de Argentina y disminuye hacia el suroeste del país. El aumento de la longitud del período de heladas se asocia con un aumento en el número de días con heladas. Al analizar la **figura 6**, referida al período medio libre de heladas > 150 días, se observan restricciones en todo el sector patagónico a excepción de la zona del litoral, cuyas heladas están amortiguadas por el efecto de oceanidad que le imprime el océano Atlántico.

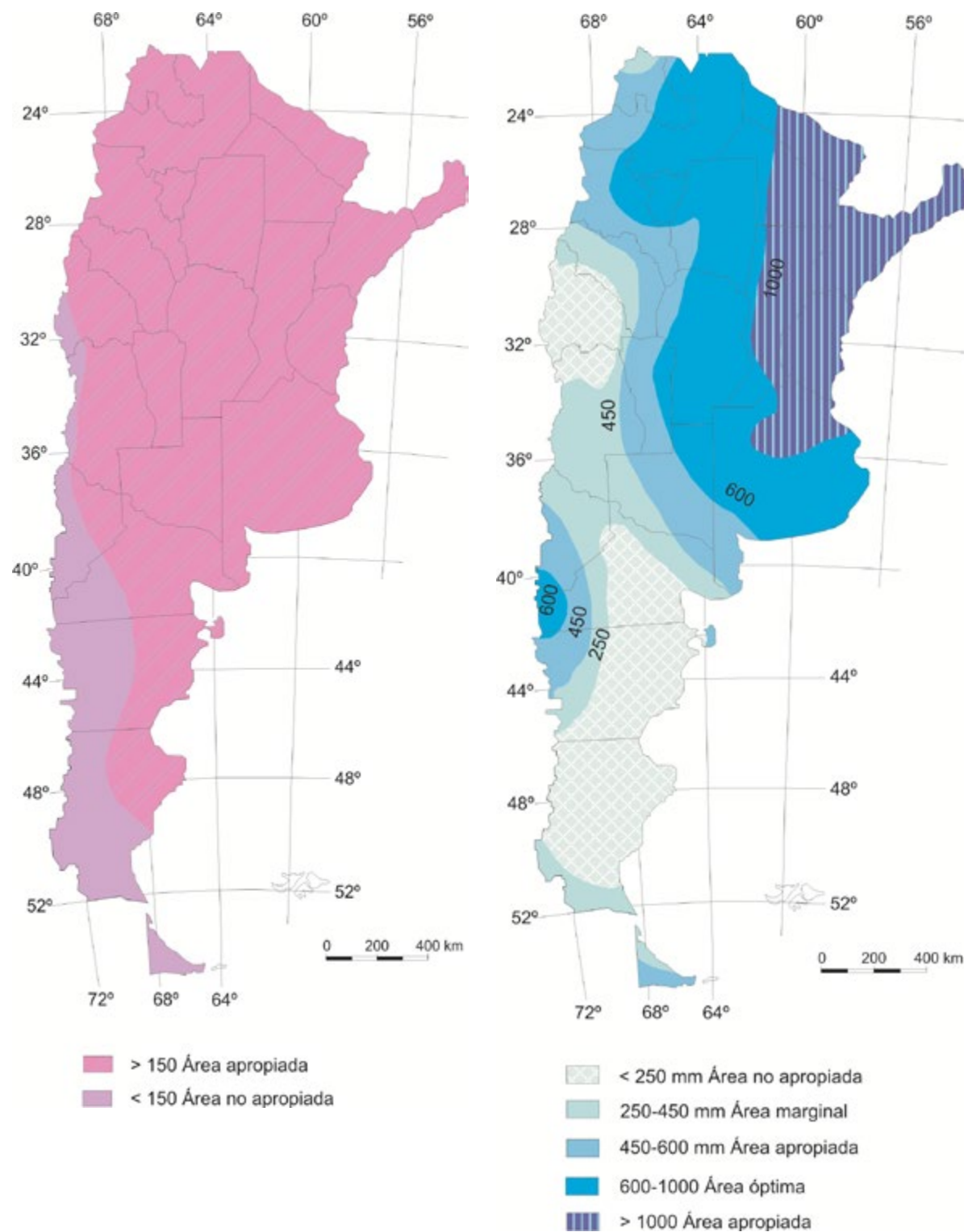
### 3.3 Regiones hídricas

La **figura 7** muestra las regiones hídricas, las cuales se diferenciaron en 5 clases de aptitud: no apropiada, marginal, apropiada (clima húmedo), apropiada (clima subhú-

medo-seco) y óptima. Las isoyetas al norte de la región Patagónica muestran el gradiente de humedad en el sentido este-oeste debido a la influencia 'Atlántica'. Las áreas óptimas presentan clima subhúmedo-húmedo y comprenden el norte, noroeste y centro de Argentina, incluyendo la mayor parte de la provincia de Buenos Aires. Hacia el este y hacia el oeste de la zona óptima se delimitan sendas áreas apropiadas, una con régimen húmedo y la otra con régimen subhúmedo-seco, respectivamente.

En las llanuras argentinas, las precipitaciones tienen su origen en una continua lucha entre masas de aire: los vientos húmedos provenientes del anticiclón del Atlántico Sur que penetran por el norte de Argentina y alcanzan el territorio central, con los vientos secos de la región patagónica, que varían en fuerza relativa de acuerdo con la estación del año. Vientos cálidos dominantes entran libremente por el norte del territorio y alcanzan el centro del país durante la estación cálida descargando gran cantidad de precipitaciones, pero se van desecando en su trayecto hacia el oeste. Como consecuencia del desplazamiento del anticiclón del Atlántico Sur hacia el norte en el invierno del hemisferio sur, un vasto sector de la Argentina carece de lluvias, las cuales solo llegan a producirse en la parte oriental del territorio. Debido a esto, las regiones del centro-este y noreste de Argentina son ambientes húmedos con régimen isohigro.

En cambio, al sur del río Colorado las masas de aire húmedo provienen del anticiclón del Pacífico Sur, los cuales siempre dominan el territorio patagónico. La precipitación anual oscila en el sector cordillerano desde más de 2.000 mm en la zona de



**Figura 6.** Período medio libre de heladas

**Figura 7.** Precipitación anual

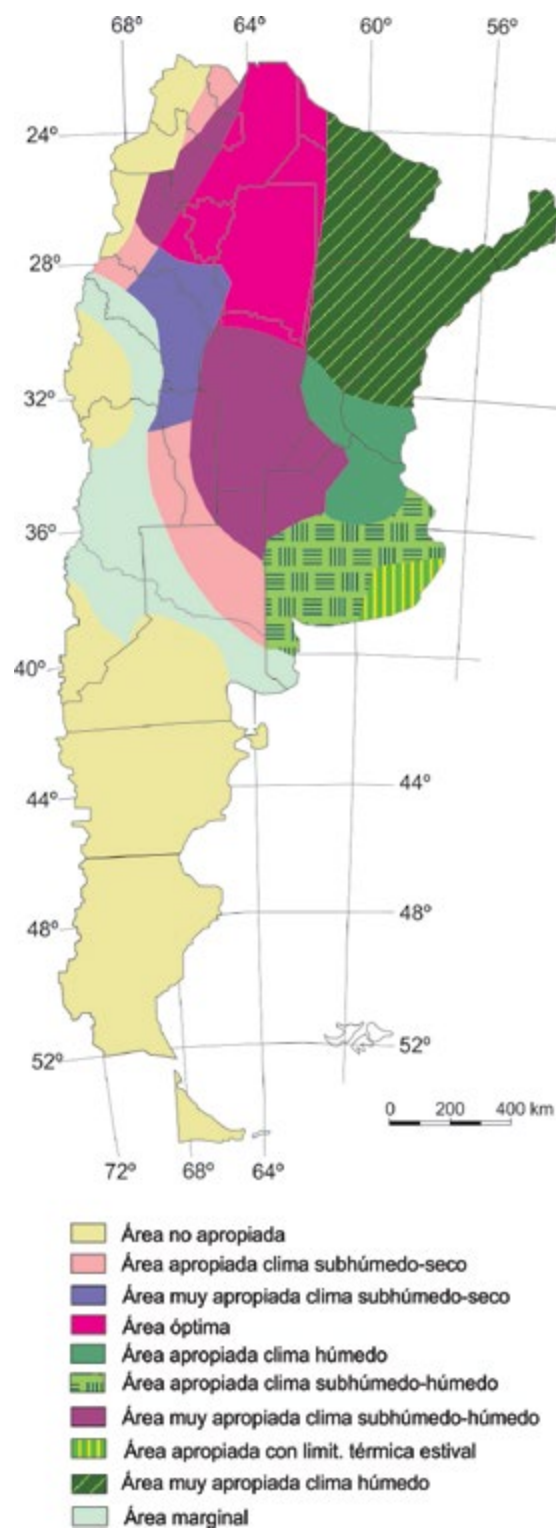
los bosques Andino-Patagónicos a 150 mm en las partes más secas de la Patagonia, mostrando el gradiente de humedad oeste-este.

### 3.4 Zonificación agroclimática para el sorgo dulce

Finalmente, en la **figura 8** se muestra la aptitud agroclimática de Argentina para el cultivo de sorgo dulce, obtenida a partir de la superposición de los seis mapas anteriores. Se delimitaron diez clases de aptitud: muy apropiada, apropiada con régimen húmedo, óptima, muy apropiada y apropiada, ambas con régimen subhúmedo-húmedo, apropiada con limitación térmica estival, muy apropiada y apropiada, ambas con régimen subhúmedo-seco, marginal y no apropiada.

En dicho mapa se aprecia que las áreas apropiadas para el cultivo del sorgo dulce alcanzan hasta los 40° S. Esto es coincidente con FAO-Ecocrop (2004) y con las zonas sorgueras definidas por el INASE (2011). Lo recomendable sería realizar el cultivo del sorgo dulce bajo condiciones de clima subhúmedo-húmedo y subhúmedo-seco, para no desplazar a los cultivos tradicionales que se desarrollan en las zonas agrícolas bajo condiciones de clima húmedo. Por lo tanto, deberá realizarse el cultivo preferentemente en la zona central y norte del país.

En el norte argentino, la inclusión del sorgo dulce en la actividad agroindustrial de la caña de azúcar, como cultivo de rotación de la soja y reemplazando a la caña de azúcar en suelos con baja retención hídrica y/o con salinidades medias, aumentará la disponibilidad de materia prima para las destilerías de bioetanol en los meses



**Figura 8.** Aptitud agroclimática argentina para sorgo dulce

anteriores a la zafra (ya que el sorgo se cosecharía durante marzo, abril y parte de mayo), aportando asimismo biomasa fibrosa para su empleo como biocombustible sólido o para bioetanol de segunda generación. La rotación con sorgo genera un alto volumen de rastrojos con una lenta descomposición, aportando nutrientes al suelo. Además, contribuirá, al contenido de materia orgánica del suelo y disminuirá las pérdidas de agua por evaporación, mejorando la infiltración del agua de lluvia.

El cultivo del sorgo dulce puede transformarse en una excelente oportunidad para los productores argentinos. Incluso, en años secos, el sorgo dulce puede transformarse en un cultivo alternativo para integrar la rotación en la zona húmeda oriental de Argentina dada su adaptación natural al estrés hídrico, manteniendo su latencia durante períodos prolongados de sequía, y retomando su capacidad de crecimiento una vez que la sequía haya finalizado.

Como la obtención de etanol a partir de sorgos azucarados proviene de los azúcares presentes en el tallo (a diferencia del maíz o del sorgo granífero, donde se utiliza el almidón presente en los granos), no es necesario llegar a la etapa reproductiva, por lo que la zona agroclimáticamente apta para el sorgo dulce debería ser más amplia que para el sorgo granífero. Por ello, la determinación de la fecha óptima de corte, la evolución de azúcares en el tiempo y la respuesta a la densidad de siembra son factores cruciales a investigar para lograr los máximos rendimientos.

El sorgo ha tenido una evolución positiva en rendimientos, gracias a mejoras genéticas y, sobre todo, al aporte innova-

tor y creativo de los productores locales. Gracias a estos rendimientos, Argentina ha ido consolidando su posición como exportador de grano de sorgo a nivel mundial, ya que lidera el ranking por rendimiento entre los 10 mayores países productores del mundo. Podría suceder algo similar con el sorgo dulce, ya que el bioetanol de primera generación a partir de esta variedad posee una elevada sostenibilidad ambiental, económica y energética. Por otro lado, la simplicidad técnica del procesamiento y explotación de los subproductos garantiza la viabilidad económica de las plantas descentralizadas de pequeña y mediana escala, de un máximo de 15.000 toneladas al año, por lo que sería una alternativa interesante para pequeñas y medianas empresas. Además, la utilización de sorgo dulce para producir biocombustible tendrá un mínimo impacto sobre el mercado alimentario mundial porque tiene escasa demanda como alimento humano, contrariamente con lo que sucede con el maíz.

## 4. Conclusiones

Las autoras han diseñado un modelo de zonificación agroclimática para el cultivo de sorgo dulce con fines energéticos, donde se delimitaron diez clases de aptitud para Argentina. Las áreas apropiadas llegan hasta los 40° S.

Se recomienda su cultivo bajo condiciones de clima subhúmedo-húmedo y subhúmedo-seco, es decir en la zona central y el norte del país, debido a su baja exigencia hídrica.

La inclusión del sorgo dulce en la actividad cañera agroindustrial, permitirá aumentar el suministro de materia prima en las destilerías argentinas de bioetanol

en los meses previos al inicio de la zafra, aportando asimismo biomasa fibrosa para su empleo como biocombustible sólido o para bioetanol de segunda generación

En años secos podría recomendarse su cultivo en la zona agrícola tradicional aprovechando su adaptación a bajos regímenes hídricos.

## 6. Referencias citadas

- BALLESTEROS, M.; OLIVA, J. M.; NEGRO, M. J.; MANZANARES, P. e I. BALLESTEROS. 2003. "Ethanol from lignocellulosic materials by a simultaneous saccharification and fermentation process (SFS) with *Kluyveromyces marxianus* CECT 10875". *Process Biochemistry*, 39(12): 1.843-1.848.
- BARADAS, M. W. 1994. Crop requirements of tropical crops. In: J. F. GRIFFITHS (ed.). *Handbook of agricultural meteorology*, 189-202. Oxford Univ. Press. New York.
- BLADE. 2012. *Energy Crops. Managing High-Biomass Sorghum as a Dedicated Energy Crop*. Disponible en: <http://www.bladeenergy.com/Bladepdf/BladeEnergy-Crops-ProductGuide-2012.pdf>. [Consulta: noviembre 12, 2014].
- CAMPS, M. y F. MARCOS. 2008. *Los biocombustibles*. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- CÁRDENAS, G. J.; DIEZ, O. y E. QUAIA. 2007. "Bioetanol: un combustible con posibilidades productivas en Tucumán". *Avance Agroind*, 28(1): 9-11.
- DE JUANA, J. y J. FERNÁNDEZ. 2002. *Energías renovables para el desarrollo*. Thomson Paraninfo. Madrid, España.
- DENDY, D.A. 1995. "Sorghum and Millets: Chemistry and Technology". *American Association of Cereal Chemists*, 11-26. Inc., St. Paul, Minnesota. USA.
- DUKE J. K. 1983. *Handbook of Energy Crops*. Disponible en: [https://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke\\_energy/Sorghum\\_bicolor.html](https://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/Sorghum_bicolor.html). [Consulta: agosto, 2014].
- DOOREMBOS, J. y A. H. KASSAM. (eds.) 1979. *Yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage. Paper 33. Rome, Italy.
- EL CRONISTA. *En un año la Argentina duplicó la importación de nafta y gasoil. 13 de mayo de 2014*. Disponible en: <http://www.cronista.com/economiapolitica/En-un-año-la-Argentina-duplico-la-importacion-de-nafta-y-gasoil-20140513-0058.html> [Consulta: septiembre 9, 2014].
- FAO-Ecocrop 1. 1994. *The adaptability level of the FAO crop environmental requirements database*. Versión 1.0. AGLS. FAO. Rome, Italy.
- FAO-Ecocrop. 2004. *The Crop Environmental Requirements Database and The Crop Environmental Response Database*. [Consulta: septiembre, 2014. Disponible en: <http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/cropView?id=1982>.
- IGLESIAS, R. y E. TAHA. 2010. *Monografías de especies anuales, arbustivas y acuícolas con potencial energético en Chile*. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Chile.

- INSTITUTO NACIONAL DE SEMILLAS (INASE). 2011. *Evaluación de sorgo dulce para producción de etanol. Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de sorgo para silo y sorgo dulce*, 31-44.
- LEY 26.093. 2006. *Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles*. Infoleg / Ministerio de Economía. Buenos Aires. 19 de abril de 2006. Disponible en: <http://infoleg.mecon.gov.ar/infolegInternet/anexos/115000.../norma.htm>.
- MAMMA, D.; KOULLAS, D.; FOUNTOUKIDIS, G.; KEKOS, D.; MACRIS, B. J. y E. KOUKIOS. 1996. "Bioethanol from sweet sorghum: simultaneous saccharification and fermentation of carbohydrates by a mixed microbial culture". *Process Biochemistry*, 31: 377-381.
- NEILD, R. E. 1982. "Temperature and rainfall influences on the phenology and yield of grain sorghum and maize: a comparison". *Agricultural Meteorology*, 27: 79-88.
- PEACOCK, J. M. 1982. Response and tolerance of sorghum to temperature stress. Sorghum in the Eighties. *Proceedings of the International Symposium on sorghum*. ICRISAT. pp. 143-160. India.
- RESOLUCIÓN N° 44/2014. Biocombustibles Naftas-Proporción de Bioetanol-Modificación Resolución N° 1294/2008. Publicada en el Boletín Oficial del 22-sep-2014. N° 32.973; Pág. 5. Disponible en: <http://www.infoleg.gov.ar/infolegInternet/verNorma.do;jsessionid=1E930B65E894DB35A410D-60536957F08?id=235362>. [Consulta: septiembre 22, 2014].
- ROMERO, E. R.; CÁRDENAS, G; SCANDALIARIS, J. y S. CASEN. 2010. "Aprovechamiento bioenergético integral de la caña de azúcar y sorgo azucarado en el NOA. Importancia y perspectivas". *Avance Agroind*, 31(3): 19-25.
- RUIZ, C. y D. SOLTERO. 1993. "Necesidades térmicas para la floración de sorgo en la Ciénaga de Chapala". *Fitotecnia*, 16(1): 79-87.
- SAN MIGUEL, P. 2008. "Demanda y producción de agrocombustibles en España y en la Unión Europea". *Revista Tierra*, 13: 29-37.
- WHITEMAN P. C. y G. L. WILSON. 1965. "The influence of shoot removal on drought survival of sorghums". *Papers*, 4: 223-239.
- WOODS, J. 2000. *Integrating sweet sorghum and sugarcane for bioenergy: modelling the potential for electricity and ethanol production in SE Zimbabwe*. King's College London, University of London, Gran Bretaña. Tesis de Doctorado en Filosofía.

Lugar y fecha de culminación:  
Buenos Aires, Argentina,  
diciembre, 2014