



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Facultad de Agronomía

Maestría en Meteorología Agrícola

Aptitud agroclimática del territorio argentino para el cultivo de  
cáñamo (*Cannabis sativa*) y la producción de principios activos de  
interés medicinal.

Tesis presentada para optar al título de Magíster de la Universidad de

Buenos Aires en Meteorología Agrícola

Maestrando: Ing. Agr. Francisco Mora

Director de Tesis: Ing. Agr. M.Sc. Daniel Sorlino

Buenos Aires, 2019.

Fecha de defensa: 17 de diciembre de 2019

# **Aptitud agroclimática del territorio argentino para el cultivo de cáñamo (*Cannabis sativa*) y la producción de principios activos de interés medicinal.**

## Resumen

El cáñamo (*Cannabis sativa*) es uno de los cultivos industriales con más historia del mundo. Su cultivo con fines textiles en Argentina tuvo su mayor auge en la primera mitad del siglo XX hasta el comienzo del prohibicionismo en 1960. Ante el reciente redescubrimiento de esta especie para fines medicinales, en 2017 se promulgó en la Argentina una ley que fomenta la investigación médica y científica para el uso medicinal de la planta de *Cannabis sp.* y sus derivados.

A partir de la recopilación de información climática y bibliográfica se elaboraron índices bioclimáticos. Trabajando con softwares estadísticos y sistemas de información geográfica se establecieron, a partir de una clasificación por tipos agroclimáticos, en primer lugar, zonas agroclimáticamente aptas para la producción de cáñamo en Argentina, con ciclos de cultivo que terminan en plena floración, que es el momento de cosecha con fines medicinales. En segundo lugar, dentro de las regiones anteriores, se delimitaron las zonas que potencian la producción de los principios activos de interés medicinal que produce esta especie.

Se determinó así un área óptima para el cultivo de cáñamo que abarca el centro y este de San Luis, Córdoba, Santa Fe, Entre Ríos, suroeste de Corrientes, noreste de La Pampa y norte y sudeste de Buenos Aires. En cuanto a la delimitación de las zonas que potencian la producción de principios activos de interés medicinal, éstas abarcan el este de Córdoba, centro y sur de Santa Fe, centro y sur de Entre Ríos, noreste de La Pampa y norte de Buenos Aires. Los resultados tuvieron en cuenta la posibilidad de uso de cultivares de diferentes longitudes de ciclo y, además, se determinaron subzonas aptas para el cultivo mediante el uso de riego y también zonas marginales.

## **Agroclimate aptitude for hemp cultivation (*Cannabis sativa*) and the production of its active substances for medical purpose in Argentina.**

### **Abstract**

Hemp (*Cannabis sativa*) is one of the most historical industrial crops of the world. Its exploitation for textile purposes in Argentina reached its peak during the first half of the 20th century and it lasted until the beginning of the prohibitionist in the sixties. Given the rediscovery of its medical use, in 2017 Argentinian congress enacted a law which promote the investigation of *Cannabis sp.* and its derivatives for medical or scientific purposes.

Starting with a recollection of climate information accompanied by a bibliographic compilation, different bioclimatic indexes has been made. Then, working with statistics softwares, geographic information systems and through an agroclimatic types classification, suitable agroclimatic areas for hemp cultivation in Argentina were established. Finally, given those areas, specific zones were delimited in which the main substances for medical purpose are efficiently produced.

This is how the optimum area in Argentina for hemp to grow up is composed of the east and center of San Luis, Córdoba, Santa Fe, Entre Ríos, south-west of Corrientes, north-east of La Pampa, north and south-east of Buenos Aires. Regarding to the potential zone in which hemp main substances for medical purpose are efficiently produced, it is composed of the east of Córdoba, south and center of Santa Fe, South and center of Entre Ríos, north-east of La Pampa and north of Buenos Aires. These results took into account crops cycles with different lengths. Also, subzones have been determined as suitable for cultivation with irrigation, as well as marginal zones.

## Agradecimientos

Gracias Jose, por estar, acompañarme, ayudarme, apoyarme y bancarme en estos años de maestría. Una nueva etapa que cierro a tu lado.

Gracias Miriam porque tu curiosidad hacia el *Cannabis* despertó mi profesión.

Gracias a mi familia por apoyarme en este camino en el que me he adentrado, y sobre todo gracias a mis padres por entender y apoyarme en las decisiones que he tomado.

Gracias a la Universidad Nacional del Sur y al Departamento de Agronomía por permitirme la posibilidad de seguir capacitándome. Gracias Ricardo y Andre por bancarme en estos años de viajes y cronogramas condicionados, gracias por el apoyo y gracias Andre por enseñarme a trabajar con QGIS. Gracias también a Cecilia Pellegrini, Pablo Polci, Sandra Baioni, Maxi Garay y Pablo Marinangeli por el apoyo y los consejos que me han dado.

Gracias Guillín. Me has regalado el sentimiento de tener mi propio hogar en Buenos Aires. Gracias por tu generosidad y tu amistad.

Gracias Ciudad Autónoma de Buenos Aires, me has recibido como en mi casa durante mis largos viajes en los años que duró la Maestría. Aprendí a disfrutar, y mucho, el inmenso, ecléctico y equilibrado caos que te domina.

Gracias Universidad de Buenos Aires; Gracias Facultad de Agronomía; Gracias Facultad de Ciencias Exactas; Gracias Olga, Liliana y toda la comisión de la Maestría en Meteorología Agrícola. Les agradezco que hayan considerado, aprobado y apoyado, desde un primer momento, mi tema de tesis. Les aseguro que, de vuestras aulas, surgió un nuevo profesional, con una seguridad, motivación y convicción que ustedes forjaron.

Gracias Daniel por asumir la dirección de esta tesis. Gracias por el tiempo que me has regalado, por las reuniones de WhatsApp, por los consejos, por el compromiso.

Gracias a la Fefa y al Chango por la traducción del resumen.

Gracias Pablo y Maxi por tomarse el tiempo de leer este trabajo y ayudarme con sus correcciones finales.

Gracias Iktami y Fede por abrirme la puerta de sus casas y enseñarme sobre esta planta.

Gracias a mis compañeros de maestría, que en poco tiempo se han vuelto mis amigos. Johan, Gustavo, Marce, Jorgito, Elmer. Ha sido un placer conocerlos y compartir esta etapa con ustedes. Las diferencias que hemos tenido en banderas, historias, acentos, comidas y pensamientos, han hecho de nosotros mejores personas. Se extrañarán los asados con gusto a Caribe y la música del Paraguay.

Gracias a la vida y a la infinita serie de causalidades que me han traído hasta aquí.

*Dedicado al Ing. Agr. Higinio Rubén Batallanez*

# Índice de contenido

Resumen .....	I
Abstract.....	II
Agradecimientos.....	III
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 Antecedentes de la investigación .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Descripción botánica de Cannabis sp .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Importancia en el campo de la medicina .....</b>	<b>6</b>
<b>1.4 Clasificación por tipos agroclimáticos de cultivos.....</b>	<b>7</b>
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Datos climáticos.....</b>	<b>8</b>
2.1.1 Control de calidad de la información climatológica modelada.....	9
<b>2.2 Clasificación por tipos agroclimáticos.....</b>	<b>10</b>
2.2.1 Normas de la clasificación por tipos agroclimáticos .....	10
A. <i>Determinación del tipo bioclimático</i> .....	11
B. <i>Valoración del agroclima</i> .....	11
C. <i>Índices agroclimáticos derivados de la experimentación bioclimática</i> .....	14
2.2.2 Clasificación agroclimática .....	14
<b>2.3 Análisis de los datos para la clasificación agroclimática .....</b>	<b>15</b>
2.3.1 Selección de los sitios a analizar .....	15
2.3.2 Selección del período del año a analizar .....	16
<b>2.4 Regionalización.....</b>	<b>17</b>
2.4.1 Regiones térmicas .....	18
2.4.2 Regiones hídricas.....	19
2.4.3 Regiones fotoperiódicas.....	21
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1 Validación de la información climática modelada .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2 Clasificación por tipos agroclimáticos.....</b>	<b>22</b>
3.2.1 Regionalización.....	22
A. <i>Regiones térmicas</i> .....	22
B. <i>Regiones hídricas</i> .....	29
C. <i>Regiones fotoperiódicas</i> .....	34
3.2.2 Tipos agroclimáticos de la Argentina para el cultivo de cáñamo.....	38
3.2.3 Regiones óptimas para la producción de principios activos de interés medicinal ....	43
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>52</b>
<b>5. REFLEXIONES PARA FUTUROS ESTUDIOS .....</b>	<b>53</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXO II.....</b>	<b>72</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

El cáñamo es uno de los cultivos industriales con más historia en el mundo (Schultes, 1970). Es originario de Asia central, y lleva miles de años presente en la cultura oriental donde fue domesticado para la obtención de fibra de sus tallos, aceite de sus semillas y resina de sus glándulas epidérmicas (Dewey, 1914; Miller, 1970; Small et al., 1975). Sin embargo, estuvo ausente en el Nuevo Mundo hasta el año 1545 (Small et al., 1975), momento en el que fue traído por las colonias españolas para la producción de fibra.

Desde tiempos antiguos se sabe también de los efectos psicoactivos de sus resinas, atributo que tuvo un rol protagónico en rituales de innumerables religiones en China, India y África (Touw, 1981), y que es la causante del prohibicionismo que corre en los tiempos modernos. En 1961 la Convención Única sobre Estupefacientes de las Naciones Unidas prohibió, a nivel mundial, el cultivo de *Cannabis* por ser considerado dañino para la salud (ONU, 1961). Dicha consideración, surge de un momento histórico donde Estados Unidos necesitaba una justificación para controlar minorías raciales que consumían *Cannabis* por su cultura ligada a raíces árabes, y también frenar la industria textil que generaba este cultivo ante el reciente descubrimiento del nylon (Soriano, 2017). En este marco el fenómeno prohibicionista se expandió a escala mundial, pese a que años antes el mismo ejército de Estados Unidos determinó, a través de un estudio, que “no se consideran aconsejables los intentos por prohibir su venta o su uso” (Siler et al., 1933). Años más tarde, algunos países volvieron a rever la legalidad del cultivo con fines industriales en primera instancia, y luego también con fines medicinales y/o recreativos, mientras otros, siguen hasta el día de hoy con la misma situación legal que en la década del '60 (Escohotado, 2002).

En América Latina la mayoría de los países mantuvo la postura original prohibicionista, muchos de ellos, hasta la actualidad. Sin embargo, poco a poco la situación se fue revirtiendo. En Paraguay se legalizó la tenencia para uso medicinal bajo receta en 1988 (Ley N° 1.340, 1988), en Chile se despenalizó el cultivo personal en 2005 (Ley N° 20.000, 2005), Uruguay legalizó el cultivo de *Cannabis* con uso medicinal en el 2013 (Ley N° 19.172, 2013) y en Argentina, la situación no ha cambiado mucho desde el auge prohibicionista. Recién en 2017, se promulgo la Ley N° 27.350, que fomenta la investigación médica y científica para el uso medicinal en epilepsia refractaria.

Pese a que en el momento de la finalización de esta tesis (17 de diciembre de 2019) todavía no se otorgaron autorizaciones a nivel nacional para el cultivo de *Cannabis* con fines de investigación científica, la evaluación de posibles zonas de cultivo en el país puede ser un elemento útil para la aplicación de futuras leyes que regulen la producción con fines medicinales o industriales y la propicien en zonas adecuadas para la optimización de la expresión genotipo-ambiente.

A pesar de que el cultivo de *Cannabis* con fines medicinales se encuentra muy ligado a la historia humana, la investigación científica occidental al respecto es muy reciente y la gran mayoría de las publicaciones están enfocadas a cuestiones bioquímicas, mientras que, por el lado agronómico, muchas están orientadas a la producción de fibra y tienen origen en el hemisferio norte. Pese a esto, la producción de cáñamo para la obtención de fibra, otorga datos valiosos para establecer los posibles requerimientos del cultivo con fines medicinales, debido a que el ciclo del cultivo para producir fibra se realiza hasta el momento en que comienzan a lignificarse los tallos en el estado fenológico de fructificación o plena floración, estado en que las inflorescencias femeninas estarían también en momentos óptimos para su cosecha con fines medicinales, dado que los compuestos de interés medicinal, denominados cannabinoides, se encuentran en la resina, de los pelos glandulares llamados tricomas, concentrados en su gran mayoría en la superficie de las inflorescencias femeninas. El resto del ciclo de vida de la planta no tiene relevancia para ninguno de los fines productivos. Adicionalmente, los protocolos para la producción “indoor” o en invernáculo pueden brindar parámetros teóricos para la optimización de la producción de resinas (Sorlino, comunicación personal).

Con los conocimientos y avances científicos actuales, los objetivos del presente trabajo son: (a) Determinar la aptitud agroclimática del territorio argentino para el cultivo de cáñamo (*Cannabis sativa*) y (b) Delimitar las zonas del país que posean condiciones climáticas que favorezcan la producción de los principios activos de interés medicinal. Dichos supuestos se basan en la hipótesis de que la información global existente es suficiente para establecer en la Argentina zonas agroclimáticamente aptas para la producción de cáñamo, con ciclos que terminen en plena floración y, que las condiciones establecidas para la optimización de la producción de cannabinoides en condiciones controladas o

semicontroladas, pueden ser referencia teórica útil para perfeccionar la zonificación agroclimática.

### **1.1 Antecedentes de la investigación**

A partir de la recopilación de trabajos científicos se observa que el cáñamo es un cultivo poco estudiado en comparación con otros de dispersión mundial como el trigo o la soja. Sin embargo, existen varios trabajos que muestran la influencia de determinados factores meteorológicos sobre la producción de principios activos por parte de la planta (Sikora et al., 2011; Zhang & Björn, 2009; Struik et al., 2000, Van der Werf et al., 1994; Lydon et al., 1987; Mahlberg & Hemphill, 1983; Pate, 1983; Bazzaz et al., 1975). Asimismo, se han reportado estudios de ensayos geográficos y siembras continuadas para evaluar fenología y rendimientos (fibra) en distintas variedades de cáñamo (Lisson & Mendham, 2000). No se encontraron trabajos de zonificación para el cultivo. En el Boletín de Divulgación N° 103 del INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria de Uruguay), artículo dedicado al cultivo de cáñamo, se realiza una caracterización agroclimática del país, y luego se hace mención a la adaptación del cáñamo a su clima, sin utilizar la zonificación como herramienta metódica (Fassio et al., 2013). Otro trabajo que se acerca a la temática es el de Anwar et al. (2006) en el que se llevó a cabo una caracterización analítica de los componentes de aceite de *Cannabis* de diferentes zonas agroecológicas de Pakistán. Ante lo expuesto, resulta evidente la importancia del presente trabajo, ya que utiliza la zonificación como una herramienta conocida y estandarizada ante un tema de actualidad y de futura demanda.

### **1.2 Descripción botánica de Cannabis sp**

*Cannabis sp.* presenta un ciclo de cultivo anual, siendo una planta de porte erecto, de mediana a alta estatura. Los hábitos de crecimiento son fuertemente influenciados por el medioambiente. En un lugar abierto, con suficiente radiación incidente, suelos bien drenados y suficiente agua y nutrientes, puede crecer más de cinco metros en un período de cuatro a seis meses. Sin embargo, cuando crece en lugares áridos sin el aporte necesario de

nutrientes, desarrolla un follaje mínimo que le permite madurar a los 20 cm de altura, en un período de dos meses desde su siembra (Clarke & Merlin, 2013).

El cáñamo germina en un período que varía entre tres a diez días luego de lo cual emergen los cotiledones y aparece el primer par de hojas verdaderas. La filotaxis en el período vegetativo es de pares opuestos e incrementando en cada nudo, el número de foliolos. El primer par es unifoliolado, el segundo par tiene tres foliolos, luego cinco, y así puede llegar a haber hojas con hasta 13 foliolos. En un ambiente adecuado, puede llegar a crecer hasta 10 cm por día (Clarke, 1997).

*Cannabis sp.* es una especie dioica, aunque ocasionalmente pueden aparecer ejemplares monoicos o hermafroditas (Lisson & Mendham, 2000). Su polinización es anemófila y su polen puede recorrer cientos de kilómetros (Clarke & Merlin, 2013).

El primer signo de floración es la aparición de primordios de flores en las axilas de las hojas, entre las estípulas, en el tallo principal. Antes de la floración no es posible distinguir fehacientemente entre sexos, sin embargo, en cultivos en baja densidad, las hembras suelen tener un porte más bajo con mayores ramificaciones que los machos. Cuando es sembrada en alta densidad con fines industriales (fibra), la planta no presenta ramificaciones y crece en altura (Clarke & Merlin 2013). Una vez iniciada la floración, los individuos masculinos se diferencian porque sus primordios de flores son curvos, con forma de garra, a lo que le sigue el crecimiento de pimpollos florales, de puntas redondeadas con cinco segmentos radiales. La floración femenina, se manifiesta por el alargamiento de un cáliz tubular simétrico (Clarke, 1997). En ambos sexos, cuando comienza la floración, la filotaxis generalmente cambia de opuesta a alterna (Schaffner, 1926; Bócsa & Kraus, 1998), y en cada nudo, decrece la cantidad de foliolos, terminando de desplegar sus últimas hojas con un solo foliolo.

Los tiempos de desarrollo de las etapas reproductivas en ambos sexos son heterogéneos. Las plantas masculinas tienden a florecer y senescer antes que las femeninas (Van der Werf et al., 1995b). En general, la aparición de los estambres en plantas masculinas, ocurre aproximadamente dos semanas antes que los estilos en las plantas femeninas (Clarke, 1997).

En las femeninas, las inflorescencias son compactas y frondosas, y sus flores son pequeñas y verdes pasando inadvertidas dentro de sus brácteas perigonales. Durante la

antes, dos estilos sobresalen desde cada bráctea. Luego de la polinización, los frutos aquenios se endurecen y la planta comienza a despojarse de ellos. En las plantas monoicas, las flores masculinas aparecen usualmente en las puntas de las ramas femeninas, cuando estas últimas están en plena floración (Clarke & Merlin, 2013).

En cuanto al interés medicinal, los cannabinoides son una clase única de terpenofenóles que solo existen en el género *Cannabis*, y se acumulan principalmente en los tricomas (Kim & Mahlberg, 1997) y, a su vez, la densidad de estos tricomas es mayor en la superficie externa de las brácteas de las inflorescencias femeninas que en las masculinas (Clarke & Merlin 2013).

### **1.3 Importancia en el campo de la medicina**

El aprovechamiento terapéutico de la resina de *Cannabis* acompaña la domesticación de esta planta hace más de 8500 años (Schultes, 1969; Schultes and Hofmann, 1973). La primera mención escrita donde se referían sus cualidades fue realizada hace más de 4700 años en un libro de plantas medicinales y venenosas, el Pen Ts'ao Ching, compilado en el año 100 a.C. pero atribuido al legendario Emperador Rojo Shen Nung, 2700 a.C. (Hou, 1977).

A pesar que el cultivo de *Cannabis* con fines medicinales tiene larga historia al lado del hombre, la investigación científica al respecto es muy reciente y, como se menciona, la gran mayoría de las publicaciones están orientadas a la producción de fibra y provienen del hemisferio norte. Los primeros estudios acerca de los principios activos del *Cannabis* fueron realizados por Rafael Mechoulam, quien en el año 1964 descubrió el delta-9-tetrahidrocannabinol (THC) (Gaoni & Mechoulam, 1964), posteriormente dedicaría su vida al estudio terapéutico de esta especie.

A la fecha, se han detectado en las distintas variedades de *Cannabis* más de 545 compuestos conocidos (Elsohly & Slade, 2005), además de los cannabinoides, se incluyen alcanos, azúcares, compuestos nitrogenados, flavonoides, fenoles no cannabinoides, fenilpropanoides, esteroides, ácidos grasos y aproximadamente 140 terpenos diferentes (Elsohly & Slade, 2005). Se han hallado más de 109 cannabinoides (Mehmedic et al., 2010), los que se clasifican en diferentes tipos teniendo cada grupo una molécula representativa,

como el cannabigerol (CBG), cannabicromeno (CBC), cannabidiol (CBD), cannabinol (CBN) y THC, entre otros.

En cuanto al interés en Argentina, la actual Ley N° 27.350 fomenta la investigación médica y científica para el uso medicinal en epilepsia refractaria de la planta de *Cannabis* y sus derivados. En este sentido, el CBD es un principio activo con potencial benéfico en tratamientos con epilepsia refractaria (Pamplona et al., 2018) y existen varios trabajos que muestran la influencia de determinados factores meteorológicos sobre la producción de dichos principios activos por parte de la planta.

#### **1.4 Clasificación por tipos agroclimáticos de cultivos**

Para una correcta elección de los lugares a cultivar, asegurando que el ciclo ontogénico del cáñamo se complete sin dificultades ambientales, y la determinación de áreas donde el cultivo potencie la producción de los principios activos de interés medicinal, se realizó una clasificación por tipos agroclimáticos desarrollada por Burgos en 1958. El análisis de índices bioclimatológicos, plasmado en una clasificación agroclimática, implica estudiar las características comunes de los diferentes tipos agroclimáticos del cultivo de *Cannabis* en el mundo. Para esto se consideró en forma analítica la acción de los elementos meteorológicos, simples o combinados, en el crecimiento y desarrollo, marcando sus influencias en los distintos subperíodos y momentos críticos, haciendo foco en las exigencias biometeorológicas de mayor importancia para la optimización de la producción de CBD y THC, sus principales principios activos de interés medicinal.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio de las necesidades bioclimáticas del cáñamo comprendió, en primer término, el análisis de la información climática proveniente de 153 sitios distribuidos en 53 países productores de *Cannabis* en el mundo (Figura 1). Los sitios fueron identificados a través de un estudio realizado país por país, considerando aquellos donde el cultivo se da tanto por cuestiones naturales, culturales y ancestrales, así como aquellos países en donde se lo cultiva con fines industriales, medicinales y científicos, sin descartar la gran cantidad de sitios donde su cultivo prospera de manera ilegal con otros fines. En segundo término, se analizó detalladamente los resultados de investigaciones previas sobre la bioclimatología y la agroclimatología del *Cannabis*, disponibles en la bibliografía científica, jerarquizando aquellas investigaciones dedicadas a la relación entre distintos elementos del tiempo y del clima con la producción de cannabinoides.

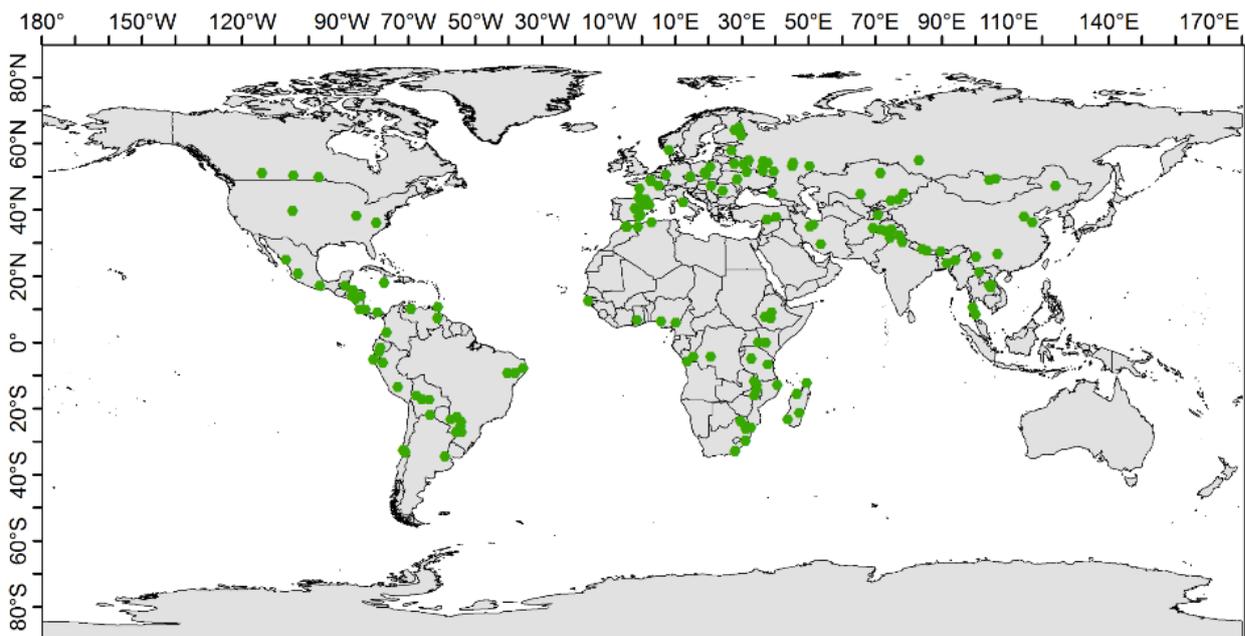


Figura 1 – En verde, sitios donde prospera el cultivo de Cannabis en el mundo

### 2.1 Datos climáticos

Los datos climáticos para estudiar las necesidades bioclimáticas de la especie fueron extraídos de estadísticas climáticas. La mayoría de los sitios relevados cuentan con datos mensuales de estaciones meteorológicas terrestres (118 sitios), los cuales fueron extraídos

de la página web del National Climatic Data Center de la NOAA<sup>1</sup> así como de las páginas oficiales de los servicios meteorológicos nacionales de los países en los cuales el *Cannabis* es cultivado. Además, se utilizaron datos modelados de la página web de Climate-Data<sup>2</sup> para los 35 sitios en los que ninguna de las alternativas anteriores pudieron aportar suficiente información (Figura 2). Dichos datos modelados se recopilaron también para 106 de los 118 sitios que contaban con información climática terrestre, con el fin de realizar una validación estadística y así testear la calidad de los modelos.

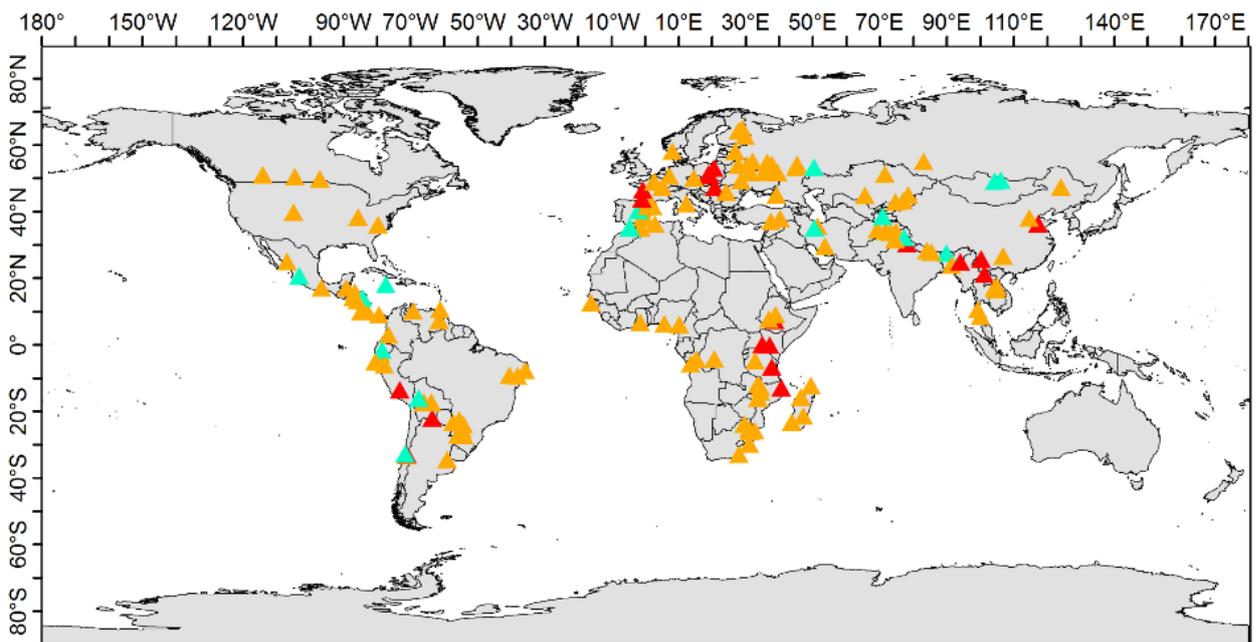


Figura 2 – Tipos de datos climáticos de los sitios donde prospera *Cannabis* en el mundo. (▲) Datos de estaciones meteorológicas terrestres, (▲) Datos de temperatura de estaciones meteorológicas terrestres y datos de precipitación modelados y (▲) Datos modelados.

### 2.1.1 Control de calidad de la información climatológica modelada

Para analizar la posibilidad de utilizar los datos modelados se procedió a evaluar las diferencias de medias entre los datos modelados y los observados en los 106 sitios donde se contaba con ambos tipos de datos. La prueba se realizó a partir de un análisis de sus varianzas mediante el test de Fisher y luego de sus medias a partir del test de Student (ANEXO I).

<sup>1</sup> <https://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdoselect.cmd?datasetabbv=GSOD&resolution=40>

<sup>2</sup> <https://es.climate-data.org/>

El análisis de varianza y de medias se llevó a cabo para las variables de temperatura mensual media y precipitaciones mensuales, y se realizó en diferentes estratos:

- Análisis de los 106 sitios (n=1272).
- Análisis de los 26 sitios ubicados entre los 0 y 100 metros sobre el nivel del mar (n=312).
- Análisis de los 60 sitios ubicados entre los 100 y 1000 metros sobre el nivel del mar (n=720).
- Análisis de los 20 sitios ubicados a una altura mayor a 1000 metros sobre el nivel del mar (n=240).
- Análisis de los 73 países del hemisferio norte (n=876)
- Análisis de los 33 países del hemisferio sur (n=396)
- Análisis del trimestre cálido en los 106 sitios (n=318)

## **2.2 Clasificación por tipos agroclimáticos**

A partir del análisis de la información climática proveniente de los 153 sitios productores de *Cannabis* en el mundo; de la información bioclimática sobre necesidades, exigencias y tolerancias climáticas obtenidas de trabajos científicos experimentales; junto con la disponibilidad de información agroclimática del país disponible en el Atlas agroclimático digital de la Argentina para el período 1981-2010 (Murphy, comunicación personal), se llevó a cabo una clasificación por tipos agroclimáticos a través de un análisis de aproximaciones sucesivas para determinar las zonas marginales, aptas y óptimas del territorio argentino para el cultivo de cáñamo y la producción de principios activos de interés medicinal.

### **2.2.1 Normas de la clasificación por tipos agroclimáticos**

Antes de desarrollar la clasificación agroclimática se analizó brevemente cada una de las normas recomendadas por Burgos (1958).

### A. Determinación del tipo bioclimático

*Cannabis sp.* es originariamente una especie atermocíclica y afotocíclica, es decir, presenta tejidos activos en coincidencia con la termofase positiva del termoperíodo anual y con la fotofase negativa del período de variación anual referido. Cabe destacar, que, en cuanto al fotoperiodismo, se han seleccionado a través de la domesticación, variedades indiferentes que cumplen su ciclo ontogénico con fotoperíodos de 24 horas de luz.

### B. Valoración del agroclima

#### B.1. de la región de origen de la especie

Partes de Asia central (desde el Cáucaso hasta las montañas de Altai), el sur de Asia (a través de las estribaciones del Himalaya y las montañas del Hindu Kush) y Asia oriental (en la región montañosa de Hengduan-Y Ungui o a lo largo de los ríos Yangzi y Huang He de la actual China) se han propuesto como posibles ubicaciones para el área de origen y domesticación primaria del *Cannabis* (Kaplan, 1969; De Candolle, 1967; Vavilov, 1931), y todas estas regiones probablemente jugaron un papel en la evolución del *Cannabis* en un momento u otro (Clarke & Merlin, 2013). El origen geográfico exacto todavía no es claro debido a los numerosos desplazamientos que tuvo naturalmente el *Cannabis* durante los ciclos glacial/interglaciales que cubren cientos de miles de años atrás. El último período interglacial denominado Holoceno, en el que nos encontramos actualmente, comenzó hace aproximadamente 10.000 años y solo explica el último ciclo de expansión y adaptación de la especie. De todos modos, Asia Central es el lugar más aceptado como ubicación para el origen y evolución temprana del *Cannabis* (Clarke & Merlin, 2013).

Las poblaciones de *Cannabis* salvaje se encuentran en la actualidad creciendo en climas templados en altas latitudes, en regiones continentales cálidas con lluvias de primavera y principios de verano, seguidas de un otoño seco y fresco, y acompañado por una gran fluctuación de la duración del día (Clarke & Merlin, 2013). Estas condiciones podrían considerarse como las exigencias predominantes mantenidas por una especie de poca dispersión en el mundo, cosa que no acontece con el *Cannabis* que posee cultivares capaces de adaptarse a las condiciones más variadas. Sin embargo, debe considerarse el clima del

lugar de origen como exigencia ancestral que ha perdurado, en mayor o menor grado, en las formas agrícolas actuales, por lo cual, al seleccionar los parámetros bioclimáticos se hicieron teniendo en cuenta los orígenes ancestrales.

De los 153 sitios estudiados, 16 de ellos corresponden a lugares donde se originó y/o se naturalizó el *Cannabis* (Tabla 1).

**Tabla 1. Sitios analizados donde se originó y/o naturalizó el *Cannabis*.**

País	Ciudad	Latitud	Longitud
<b>Bhutan</b>	Timbu	27,48	89,63
<b>China</b>	Guiyang	26,62	106,63
<b>China</b>	Shijiazhuang	38,02	114,5
<b>China</b>	Qiqihar	47,33	123,95
<b>China</b>	Monte Tai	36,25	117,08
<b>China</b>	Dali	25,76	100,15
<b>India</b>	Agartala	23,85	91,28
<b>India</b>	Dehra Dun	30,32	78,02
<b>India</b>	Imfal	24,81	93,94
<b>India</b>	Manali	32,23	77,18
<b>Mongolia</b>	Darjan	49,46	105,96
<b>Mongolia</b>	Erdenet	49,05	104,07
<b>Nepal</b>	Katmandú	27,7	85,37
<b>Nepal</b>	Pokhara	28,22	84
<b>Rusia</b>	Saransk	54,2	45,18
<b>Rusia</b>	Samara	53,3	50,19

### *B.2. de la región de cultivo de la especie*

La gran dispersión del cultivo de *Cannabis* en el mundo, permite observar que prácticamente es posible encontrarlo en diferentes regiones con diferentes condiciones climáticas entre el Círculo Polar Ártico y el Trópico de Capricornio. Esta gran dispersión conduce a considerar los elementos de la clasificación en una amplia gama de jerarquías que pueda incluir a todas las combinaciones posibles.

De los 153 sitios estudiados, 137 de ellos corresponden a lugares donde se difundió el cultivo de *Cannabis* (Tabla 2).

**Tabla 2. Sitios analizados donde se difundió el cultivo de *Cannabis*.**

País	Ciudad	Lat.	Long.	País	Ciudad	Lat.	Long.	País	Ciudad	Lat.	Long.	País	Ciudad	Lat.	Long.
Afghanistan	Kabul	34,55	69,21	Estados Unidos	Greensboro	36,08	-79,8	Madagascar	Fianarantsoa	-21,44	47,08	Rep. Dem. del Congo	Matadi	-5,82	13,45
Alemania	Bonn	50,71	7,11	Estonia	Kanepi	57,98	26,75	Madagascar	Toliara	-23,33	43,68	Rumania	Sibiu	45,79	24,13
Argelia	Tlemecén	34,88	-1,31	Etiopía	Adís Abeba	8,98	38,75	Malawi	Nkhota Kota	-12,91	34,28	Rusia	Tula	54,2	37,61
Argelia	Médéa	36,28	2,76	Etiopía	Jima	7,67	36,83	Malawi	Mzimba	-11,88	33,61	Rusia	Kaluga	54,74	36,24
Argentina	Jáuregui	-34,58	-59,17	Etiopía	Shashamane	7,27	38,59	Malawi	Dedza	-14,31	34,26	Rusia	Oriol	53,02	36,04
Argentina	El Soberbio	-27,27	-54,19	Finlandia	Joensuu	62,6	29,76	Marruecos	ketama	34,91	-4,56	Rusia	Penza	53,24	45
Bielorrusia	Moguilov	53,92	30,33	Finlandia	Kajaani	64,22	27,72	Marruecos	Bab Berred	35	-4,89	Rusia	Novosibirsk	55,02	82,94
Bielorrusia	Minsk	53,96	27,56	Finlandia	Suomussalmi	64,88	28,91	Mexico	Oaxaca	17,09	-96,72	Rusia	Voronez	51,69	39,39
Bolivia	Yapacaní	-17,39	-63,88	Francia	Cazères	43,24	1,08	Mexico	Tamazula	24,95	-106,93	Rusia	Kursk	51,85	36,15
Bolivia	Cochabamba	-17,35	-66,14	Francia	Chennevières-sur-Marne	48,79	2,53	Mexico	Guadalajara	20,68	-103,34	Rusia	Smolensk	55,03	31,99
Bolivia	Yacuiba	-22,01	-63,68	Francia	Chennevières-lès-Louvres	49,05	2,54	Mozambique	Maputo	-25,91	32,59	Rusia	Krasnodar	45,03	38,98
Bolivia	Coroico	-16,14	-67,74	Francia	Dijon	47,32	5,02	Mozambique	Tete	-16,13	33,6	Senegal	Ziguinchor	12,56	-16,26
Brasil	Paulo Afonso	-9,39	-38,21	Francia	Dax	43,7	-1,05	Mozambique	Pemba	-12,97	40,51	Suazilandia	Mbabane	-26,26	31,11
Brasil	Surubim	-7,82	-35,77	Francia	Fontenay-le-Comte	46,46	-0,8	Nicaragua	Jinotega	13,17	-86,02	Sudáfrica	East London	-32,99	27,87
Brasil	Petrolina	-9,3	-40,51	Ghana	Kumasi	6,67	-1,62	Nicaragua	Rosita	13,93	-84,4	Sudáfrica	Durban	-29,85	31,01
Camerún	Bamenda	5,95	10,15	Guatemala	Melchor de Mencos	17,09	-89,16	Nigeria	Benin City	6,28	5,61	Sudáfrica	Nelspruit	-25,47	30,97
Canadá	Calgary	51,12	-114,15	Honduras	Tegucigalpa	14,14	-87,17	Noruega	Kristiansand	58,15	8,01	Sudáfrica	Pietersburg	-23,91	29,45
Canadá	Regina	50,44	-104,64	Honduras	La Ceiba	15,78	-86,77	Pakistan	Peshawar	34,01	71,58	Tailandia	Mueang Nakhon Phanom	17,39	104,78
Canadá	Winnipeg	49,88	-97,12	Hungría	Kenderes	47,25	20,66	Pakistán	Islamabad	33,69	73,06	Tailandia	Sakon Nakhon	17,16	104,15
Chile	Curacavi	-33,39	-71,12	India	Srinagar	34,08	74,83	Pakistán	Lahore	31,53	74,35	Tailandia	Mukdahan	16,57	104,51
Chile	Limache	-33	-71,25	Iran	Teherán	35,67	51,38	Panamá	Panamá	9,02	-79,52	Tailandia	Chumphon	10,5	99,17
Chile	San Felipe	-32,75	-71,71	Iran	Shiraz	29,61	53,57	Paraguay	Ciudad del Este	-25,5	-54,66	Tailandia	Nakhon Si Thammarat	8,43	99,96
Colombia	Suarez	2,95	-76,69	Iran	Saveh	35,02	50,35	Paraguay	Encarnación	-27,17	-55,9	Tanzania	Tabora	-4,94	32,71
Costa Rica	Puerto Limón	9,96	-83,02	Italia	Canepina	42,37	12,23	Paraguay	Salto del Guairá	-24,07	-54,33	Tanzania	Morogoro	-6,78	37,63
Costa Rica	Puntarenas	9,97	-84,83	Jamaica	Mandeville	18,03	-77,51	Paraguay	Zanja Pytã	-22,62	-55,62	Tayikistán	Darvoz	38,48	70,66
Ecuador	Cuenca	-2,89	-79	Kazajistán	Astaná	51,15	71,44	Paraguay	Concepción	-23,41	-57,45	Trinidad y Tobago	Piarco	10,6	-61,33
Ecuador	Riobamba	-1,66	-78,65	Kazajistán	Almatý	43,21	76,92	Perú	Chachapoyas	-6,22	-77,87	Turquía	Diyarbakır	37,91	40,19
España	Murcia	38,09	-1,13	Kazajistán	Kyzylorda	44,84	65,49	Perú	Piura	-5,18	-80,66	Turquía	Gaziantep	37,06	37,37
España	Alicante	38,45	-0,46	Kazajistán	Taldykorgan	45	78,39	Perú	Andahuaylas	-13,59	-73,36	Ucrania	Vinnitsia	49,28	28,49
España	Teruel	40,45	-1,11	Kenia	Naro Moru	-0,16	37,02	Polonia	Gmina Konopnica	51,35	18,81	Ucrania	Chernígov	51,56	31,32
España	Lérida	41,64	0,6	Kenia	Kisumu	0	34,8	Polonia	Konopki	53	20,45	Venezuela	Barquisimeto	10,08	-69,36
España	Barcelona	41,49	2,18	Kirguistán	Biskek	42,88	74,56	Polonia	Częstochowa	50,8	19,11	Venezuela	Tumeremo	7,3	-61,5
España	Cañamares	40,44	-2,22	Laos	Muang Sing	21,18	101,15	Rep. Checa	Praga	50,07	14,44				
Estados Unidos	Denver	39,74	-104,95	Madagascar	Antsiranana	-12,29	49,29	Rep. Dem. del Congo	Ilebo	-4,33	20,58				
Estados Unidos	Louisville	38,24	-85,75	Madagascar	Mahajanga	-15,7	46,34	Rep. Dem. del Congo	Kinsasa	-4,38	15,25				

### C. Índices agroclimáticos derivados de la experimentación bioclimática

Se asignó a este aspecto un gran valor para la selección de los parámetros climáticos que deben incluirse en una clasificación agroclimática. Pese a que el cáñamo es una especie de cultivo ancestral y de amplia dispersión, debido a su particularidad de estar prohibida en gran parte del mundo, no son numerosos los investigadores que han realizado trabajos experimentales con esta especie. Sin embargo, en el presente trabajo, se resumen los resultados de las investigaciones sobre la bioclimatología y la agroclimatología del cáñamo, disponibles en la bibliografía científica, incluidos en la clasificación, jerarquizando aquellas investigaciones dedicadas a la relación entre distintos elementos del tiempo y del clima con la producción de cannabinoides.

#### 2.2.2 Clasificación agroclimática

En primer lugar, se analizaron los índices y elementos térmicos, hídricos y fotoperiódicos para que, a través de un sistema de información geográfica, se representen en mapas, las diferentes zonas que permiten el cultivo de cáñamo. Luego, estos resultados parciales, se superponen con el fin de integrarlos en un mapa final que explique las diferentes oportunidades que permite la agroclimatología del territorio argentino para el cultivo de cáñamo.

En segundo lugar, partiendo del área previamente definida como óptima para el cultivo y de trabajos científicos experimentales que han determinado la influencia de factores climáticos sobre la producción de cannabinoides, se llevó a cabo una nueva delimitación para zonificar las áreas donde se vea favorecido por condiciones que potencien la producción de dichos principios activos de interés medicinal.

Todos los análisis y resultados cartográficos se realizaron mediante el software QGIS, el cual es un sistema de información geográfica de código libre.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Disponible en <https://qgis.org/es/site/forusers/download.html>

## 2.3 Análisis de los datos para la clasificación agroclimática

Los datos climáticos mensuales provenientes de los 153 sitios donde se cultiva *Cannabis*, fueron sometidos a un análisis y consistencia donde se descartaron datos que no cumplan con las siguientes sentencias:

- $T^{\circ} \text{Máxima} > T^{\circ} \text{Media} > T^{\circ} \text{Mínima}$
- $P_p \geq 0$

En cuanto al análisis de los rangos de temperaturas máximas, medias y mínimas mensuales, y precipitaciones medias mensuales, se trabajó con el 95% de los datos en torno a la media. Para ello se verificó la normalidad de los datos y se aplicó la siguiente fórmula:

- $\text{Rango} = \bar{x} \pm 2s$

Dónde:  $\bar{x}$  = Media aritmética

S = Desvío estándar

### 2.3.1 Selección de los sitios a analizar

Se encontró en los datos un amplio rango de temperaturas mensuales y amplitudes térmicas anuales (Figura 3.A), representando sus extremos a través de climas tropicales en sitios como Riobamba (Ecuador, Lat: S 1°40'15.53", Figura 3.B) y climas nórdicos como en Suomussalmi (Finlandia, Lat: N 65°0'50.69" Figura 3.C). La misma situación se observó con las precipitaciones, donde el *Cannabis* parece prosperar tanto en climas extremadamente húmedos, como en el extremo opuesto árido.

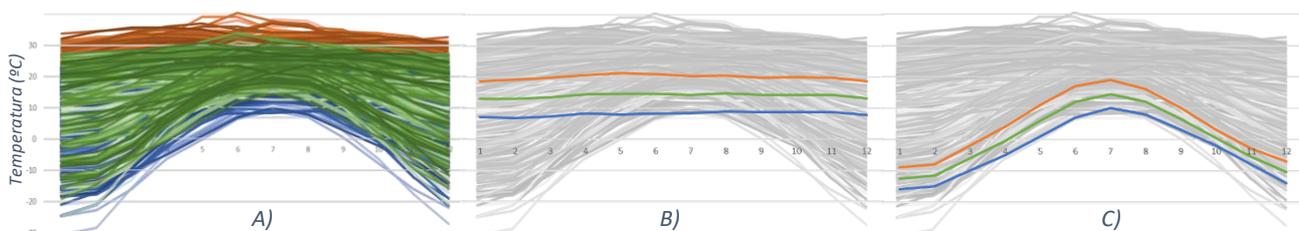


Figura 3- A) Temperatura Maxima (Rojo), Media (Verde) y Minima (Azul) mensual para los 153 sitios relevados. B) Temperatura Maxima, Media y Minima mensual de Riobamba, Ecuador. C) Temperatura Maxima, Media y Minima mensual de Suomussalmi, Finlandia.

Por las razones antes comentadas y para evitar un análisis que incluya situaciones que no existen en Argentina, se procedió realizar un filtro y trabajar solo sobre los 92 sitios relevados que se ubican dentro de las latitudes que comprende el país (Figura 4). De esta forma quedaron excluidas situaciones extremas como los cultivos de los países nórdicos y Rusia, en los cuales son ancestrales y acompañan a la cultura del hombre desde la era de los Vikingos (Skoglund et al., 2013), pero no son interesantes desde el punto de vista productivo por su ciclo de vida extremadamente corto (dos meses), aprovechando los breves veranos polares. Así también quedaron excluidos los sitios intertropicales en los cuales la temperatura no resulta condicionante para la producción de cáñamo durante los 12 meses del año (debido principalmente a la ausencia de heladas) y el cultivo, en sí, está más ligado a la distribución de las precipitaciones.

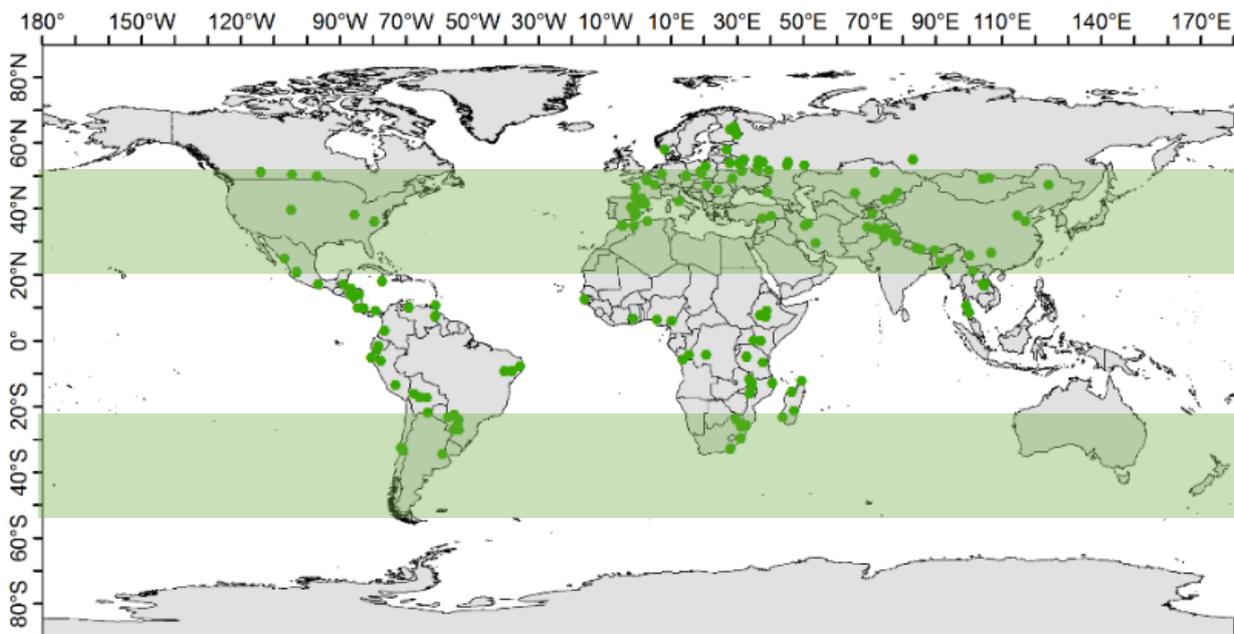


Figura 4 – Las franjas verdes contienen a los sitios ubicados entre las latitudes del territorio argentino

### 2.3.2 Selección del período del año a analizar

En cuanto al momento del año a analizar, por un lado, se consideró que *Cannabis sp.* es una especie atermocíclica y su ciclo, dependiendo de la variedad, se cumple en un período que va de cuatro a seis meses (ciclo corto y ciclo largo respectivamente) (Clarke, 1999). Por otro lado, se recopiló aquella información bibliográfica en donde los estudios incluyeran las fechas de siembra y cosecha y se las ordenó por latitud (Tabla 3). De esta forma se definió como período de análisis al que corresponde a los meses entre octubre

y marzo. Cabe aclarar que, en sitios cercanos al trópico de capricornio, cabría la posibilidad de adelantar la fecha de siembra por cuestiones térmicas, sin embargo, el fotoperíodo inductivo de los meses previos a octubre podrían acelerar el desarrollo del cultivo, haciendo que el mismo florezca prematuramente y la producción no sea rentable (Lisson & Mendham, 2000).

**Tabla 3 – Fechas de siembra (celdas marrones) y duraciones de ciclos de cultivo (celdas amarillas) de ensayos con cáñamo en distintas latitudes. S.O.: Fecha optima de siembra determinada, C.O.: Fecha optima de cosecha determinada.**

LAT	Hemisferio Norte	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D		
	Hemisferio Sur	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J		
65º	RUSIA													- Dzyubenko, N. I., & Dzyubenko, E. A. (2009) - Grigoryev, S. (2000)	
60º	FINLANDIA													- Sankari, H. S., & Mela, T. J. N. (1998) - Callaway, J. C., & Laakkonen, T. T. (1996)	
														- Pahkala, K. et al., (2008)	
57º	LETONIA													- Tang, K. et al., (2016)	
53º	REINO UNIDO													- Struik, P. C. et al., (2000)	
52º	PAISES BAJOS													- Van der Werf, H. M. G. et al., (1996). - Struik, P. C. et al., (2000)	
														- De Meijer, E. P. M., & Keizer, L. C. P. (1994) - Van der Werf, H. M. G. et al., (1994)	
															- Van der Werf, H. M. G. et al., (1995) - Van der Werf, H. M. G. et al., (1999)
															- Faux, A. M. et al., (2013)
50º	BÉLGICA												- Tang, K. et al., (2016)		
50º	REPUBLICA CHECA												- Tang, K. et al., (2016)		
48º	FRANCIA												- Tang, K. et al., (2016)		
45º	SERBIA												- Sikora, V. et al., (2011)		
45º	ITALIA													- Tang, K. et al., (2016)	
44º														- Struik, P. C. et al., (2000) - Amaducci, S. et al., (2008)	
43º	CANADÁ													- Small, E., & Marcus, D. (2000)	
42º	TASMANIA													- Lisson, S. N., & Mendham, N. J. (2000)	
41º	ITALIA													- Di Bari, V. et al., (2004)	
37º														- Cosentino, S. L. et al., (2012)	
37º														- Cosentino, S. L. et al., (2013)	
37º	ESPAÑA													- García-Tejero et al., (2014)	
34º	MARRUECOS													- Stambouli, H. et al., (2007)	
18º	TAILANDIA													- Sengloung, T. et al., (2009)	

## 2.4 Regionalización

A partir de la información climática procedente de los 92 sitios relevados que se ubican dentro de las latitudes que comprende nuestro país, para los meses comprendidos entre octubre y marzo, sumado al análisis de la información bioclimática sobre las necesidades, exigencias y tolerancias climáticas del cáñamo derivadas de trabajos científicos experimentales se procedió a realizar la clasificación por **tipos agroclimáticos de la argentina para el cultivo de cáñamo**, a partir de una delimitación

cartográfica en regiones térmicas, hídricas, fotoperiódicas. Luego, a partir de aquellos trabajos científicos experimentales que han determinado la influencia de factores climáticos sobre la producción de cannabinoides se delimitaron las **Regiones óptimas para la producción de principios activos de interés medicinal**. La información agroclimática del país para la realización de ambas delimitaciones se obtuvo del Atlas agroclimático digital de la Argentina para el período 1981-2010 (Murphy, comunicación personal).

#### 2.4.1 Regiones térmicas

Las delimitaciones de las regiones térmicas se llevaron a cabo mediante el uso de los siguientes índices:

- **Temperatura mensual media (°C)**
- **Temperatura mínima mensual media (°C)**
- **Temperatura máxima mensual media (°C)**
- **Temperatura máxima anual media (°C)**
- **Probabilidad de ocurrencia de temperaturas mayores a 40 °C (%)**
- **Fecha media de última helada (Día Juliano)**
- **Fecha media de primera helada con una probabilidad del 20% (Día Juliano)**
- **Tiempo térmico (°Cd)**

La temperatura es una de las principales fuerzas impulsoras para el crecimiento y el desarrollo de los cultivos y varios estados fenológicos se manifiestan a través de su desarrollo (Salazar, 2006; Salazar-Gutierrez et al., 2013). Con frecuencia, el tiempo calendario se ha utilizado para la predicción de las etapas de crecimiento y desarrollo de los cultivos (Slafer & Savin, 1991; Mendoza López et al., 2004); sin embargo, se han propuesto varios modelos para mejorar el uso del tiempo calendario en la predicción del desarrollo, los cuales describen el efecto de la temperatura sobre el desarrollo fenológico (Salazar-Gutierrez et al., 2013). Uno de los métodos más ampliamente utilizado es el cálculo del tiempo térmico, grados-día de crecimiento o desarrollo (GDC), unidades de calor (Ruiz-Corral et al., 2002; López et al., 2010) o tiempo fisiológico, que

se define como la cantidad de grados día necesarios para finalizar un determinado proceso de desarrollo o fase fenológica (Trudgill et al., 2005).

El cálculo del tiempo térmico resulta de sumar todas las temperaturas medias diarias, descontadas de la temperatura base del cultivo. En este trabajo se llevó a cabo siguiendo la metodología de Lindsay and Newman (1956), llevada a su expresión climática mensual (Pascale & Damario, 2004) utilizando una temperatura base de 0°C (Tamm, 1933; Meijer et al., 1995; Van der Werf et al., 1995a; Amaducci et al., 2012).

$$\sum T_{LN} = \frac{0,5 \times (tM - Tb)^2}{(tM - tm)}$$

Donde:

$T_{LN}$ : Tiempo térmico (°Cd)

$tM$ : Temperatura máxima media mensual (°C)

$tm$ : Temperatura mínima media mensual (°C)

$Tb$ : Temperatura base (0 °C)

#### 2.4.2 Regiones hídricas

Las delimitaciones de las regiones hídricas se realizaron mediante el uso de los siguientes índices:

- **Precipitación mensual media (mm)**
- **Balance hidrológico climático**
- **Evapotranspiración máxima mensual media (mm)**

$$ETm_j = ETP_j \times Kc_j$$

Donde:

$ETm_j$ : Evapotranspiración máxima del mes j (mm)

ETP<sub>j</sub>: Evapotranspiración potencial del mes j (mm) calculada a través del método de Thornthwaite

$$ETP_j = C_j 16 \left(10 \frac{T_j}{I}\right)^a$$

T<sub>j</sub>: Temperatura media mensual del mes j (°C)

$$a: 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 0,01792 I + 0,49239$$

I: Índice calórico anual

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j$$

i<sub>j</sub>: Índice calórico mensual para cada mes j

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5}\right)^{1,514}$$

C<sub>j</sub>: coeficiente de ajuste para cada mes j

$$C_j = \frac{H_j \times N_j}{12 \times 30}$$

N<sub>j</sub>: número de días del mes j

H<sub>j</sub>: horas de heliofanía astronómica promedio para el mes j

$$H_j = \frac{24}{\pi} \arccos(-\tan \delta \tan \varphi)$$

φ = Latitud (rad)

δ = Declinación solar (rad)

K<sub>cj</sub>: coeficiente de cultivo para el mes j calculado por García-Tejero et al. (2014)

donde:

1º mes de cultivo: K<sub>c</sub> = 0,6

2º mes de cultivo: K<sub>c</sub> = 0,8

3º mes de cultivo: K<sub>c</sub> = 1

4º, 5º y 6º mes de cultivo: K<sub>c</sub> = 1,2

Además de la utilización de estos índices, se elaboró un Índice de Satisfacción Hídrica para relacionar los datos de disponibilidad hídrica (Pp) y de la demanda del cultivo (ETm).

- **Índice de Satisfacción Hídrica (ISH%) (%)**
- **Distribución del ISH%**

$$ISH\% = \frac{Pp_j}{ETm_j} \times 100$$

Donde:

ISH%: Porcentaje de ETm cubierto por las precipitaciones para el mes j

Pp<sub>j</sub>: Precipitación mensual media del mes j

ETm<sub>j</sub>: Evapotranspiración máxima del mes j (mm)

#### 2.4.3 Regiones fotoperiódicas

Para las delimitaciones de las regiones fotoperiódicas se utilizaron valores diarios de fotoperíodo (hs) entre los 22 y 55º de latitud, calculados a través de la siguiente fórmula:

$$F_j = \frac{2}{15} \times \arccos \left( \frac{\text{Sen} \left( \frac{-6 \times 2 \pi}{360} \right) - \text{Sen} \varphi \times \text{Sen} \delta_j}{\text{Cos} \varphi \times \text{Cos} \delta_j} \right) \times \frac{360}{2 \pi}$$

Donde:

F<sub>j</sub>: Fotoperíodo para el día j (hs)

φ: Latitud (rad)

δ<sub>j</sub>: Declinación solar para el día j

$$\delta_j = 0,409 \times \text{Sen} \left( \left( \left( \frac{2 \times \pi}{365} \right) \times j \right) - 1,39 \right)$$

j: Día juliano

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Validación de la información climática modelada

A partir de los test de Fisher y Student realizados a los diferentes grupos de datos y sitios, se comprobó para todos los casos que no hay diferencia estadística entre los datos observados y los modelados (ANEXO I), lo que aporta confianza para realizar el presente estudio con el conjunto total de sitios relevados (Figura 2) incluyendo aquellos que tienen datos de estaciones terrestres (118 sitios), los que tienen datos de estaciones terrestres con algunas variables modeladas (19 sitios) y también aquellos que solo tienen datos modelados (16 sitios).

#### 3.2 Clasificación por tipos agroclimáticos

Como resultado de la clasificación se presentan a continuación las regiones térmicas, hídricas y fotoperiódicas, los tipos agroclimáticos de la Argentina para el cultivo de cáñamo, y las regiones óptimas para la producción de principios activos de interés medicinal.

##### 3.2.1 Regionalización

###### A. Regiones térmicas

Luego de analizar estadísticamente la información climática concerniente a los meses entre octubre y marzo, proveniente de los sitios de cultivo entre los 22º y 55º de latitud, se obtuvo el siguiente gráfico (Gráfico 1) que representa el régimen de las temperaturas máximas, medias y mínimas mensuales que deben contemplarse para la factibilidad del cultivo de cáñamo en nuestro país.

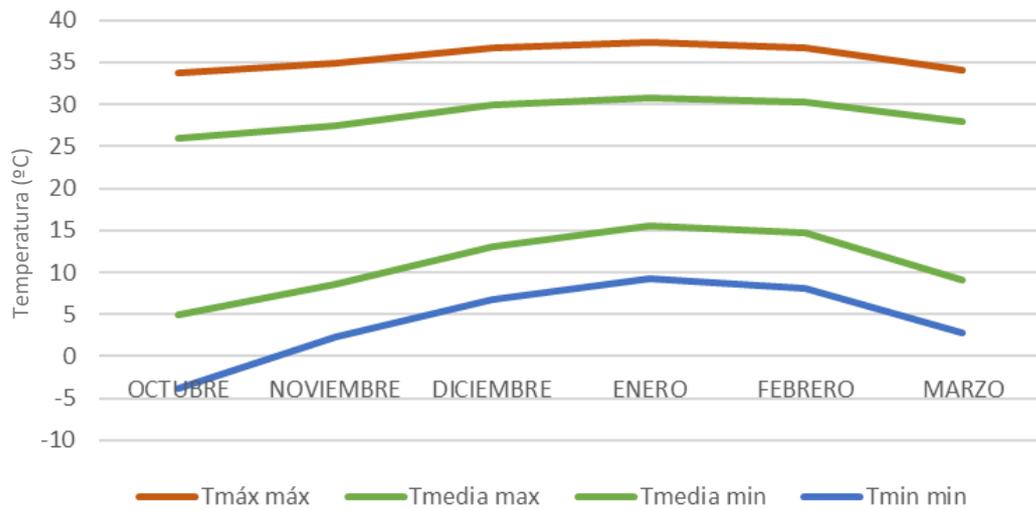


Gráfico 1 – Régimen de las temperaturas máximas, medias y mínimas mensuales de los 92 sitios donde prospera el Cannabis.

A partir de esta información se procedió a mapear las áreas del país donde las temperaturas máximas, medias y mínimas mensuales se encuentran dentro de los rangos establecidos para cada mes del semestre (Figura 5).



Figura 5 – Áreas del territorio argentino que tienen el régimen de las temperaturas máximas, medias y mínimas mensuales de los 92 sitios donde prospera el Cannabis.

Posteriormente, con el propósito de analizar el potencial productivo, se procedió a seleccionar los requerimientos térmicos agroclimáticos que determinan una correcta implantación y desarrollo. Según la información bibliográfica disponible, para el período siembra – emergencia, se necesitan alrededor de 100 °Cd (Tamm (1933) lo definió en 96 °Cd (base 0°), Van der Werf et al. (1995a) entre 68 y 109,5 °Cd (base 0°) y Lisson et al. (2000a) en 69,9 °Cd (base 1°)), y para el período emergencia – cobertura total del terreno, alrededor de 500 °Cd (Van der Werf et al. (1995a) lo definió en 465 °Cd (base 0°) y Meijer et al. (1995) entre 450 y 500 °Cd (base 0°)). Además, resulta importante que estos requerimientos (de siembra a cobertura total) sean satisfechos en un período no mayor a 45 días (Van der Werf et al., 1999), de lo contrario, se presentaría una situación de estrés por temperaturas frías devenida de una siembra muy temprana (Meijer et al., 1995).

A partir de esta información bibliográfica se analizaron los datos climáticos de los 92 sitios muestreados, y 64 de ellos (69,6%) cumplen los requerimientos térmicos en siembras de principios de octubre, 27 (29,3%) cumplen los requerimientos si se siembra en principios de noviembre y un solo sitio (1,1%) cumple los requerimientos sembrándose recién a mediados de noviembre (Erdenet, Mongolia, 49° Lat N). Al analizar la localización de estos sitios, se observa que todos aquellos que no cumplen los requerimientos térmicos en siembras de principios de octubre, están ubicados por encima de los 40° de latitud. En cuanto a las fechas de siembra, resultan coherentes para una primera diferenciación entre sitios aptos, para variedades de ciclo largo (CL) y corto (CC); aquellos sitios que permitan siembras en octubre (CL), y aquellos que cumplan los requerimientos en siembras a partir de noviembre (CC). Cabe aclarar que, en sitios cercanos al trópico de capricornio, cabría la posibilidad de adelantar la fecha de siembra por cuestiones térmicas, sin embargo, el fotoperíodo inductivo de los meses previos a octubre podría acelerar el desarrollo del cultivo, haciendo que el mismo florezca prematuramente.

De esta forma, se delimitó aquellos sitios que cumplieran con los requerimientos de tiempo térmico entre siembra y emergencia (100 °Cd), en un período máximo de 10 días (duración promedio de la etapa según Van der Werf et al., 1995a) y el período de emergencia a cobertura del terreno al 90% de la intercepción de la radiación solar (500

°Cd) en un lapso de hasta 35 días (45 días desde siembra a cobertura según Van der Werf et al., 1999). Dichos requerimientos se contemplaron para siembras de principios de octubre (Figura 6 - Ciclo largo) y siembras de principios de noviembre (Figura 7 - Ciclo



Figura 6 – Áreas que cumplen los requerimientos térmicos para cultivo de cáñamo de ciclo largo.



Figura 7 – Áreas que cumplen los requerimientos térmicos para cultivo de cáñamo de ciclo corto.

corto).

Como se observa en la Figura 8, la delimitación entre sitios aptos para cultivos de variedades de ciclo largo y variedades de ciclo corto en nuestro país ocurre aproximadamente a los 40° de latitud sur, al igual que lo observado en el análisis de los 92 sitios muestreados. Los requerimientos térmicos para cultivar variedades de ciclo largo más al sur que los 40° de latitud, solo es posible en regiones cercanas a la costa del Océano Atlántico debido al clima oceánico que presenta esta región.

Seguidamente se procedió a analizar las situaciones que pongan en riesgo la producción por la ocurrencia de temperaturas extremas. En primer lugar, se analizaron las temperaturas máximas, para lo cual se tuvo en cuenta la temperatura máxima vital, temperatura que ronda los 40°C (definida en 40,7 °C por Lisson et al. (2000a) y en 41,3 por Amaducci et al (2012)). Dicha situación de estrés causa una gran heterogeneidad

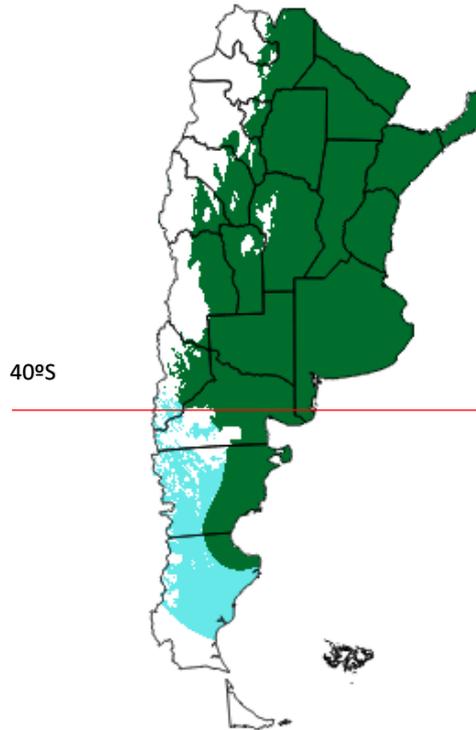


Figura 8 – Limite entre áreas que cumplen los requerimientos térmicos para cultivo de cáñamo de ciclo largo (verde) y corto (celeste).

tanto en el rendimiento de biomasa como en la duración del ciclo (Cosentino et al., 2013). De esta forma, utilizando mapas de probabilidad de ocurrencia de temperaturas mayores a 40 °C y mapas de temperaturas máximas anuales medias, se excluyeron aquellas áreas del país en donde la probabilidad de ocurrencia de temperaturas máximas mayores a 40 °C es mayor al 80% y donde las temperaturas máximas anuales medias superan los 40 °C (Figura9).

Como se observa, el área excluida resultó ser la región seca y llana del noroeste, en el ángulo donde la influencia de los vientos del anticiclón atlántico produce sólo escasas lluvias y tampoco se manifiesta el efecto orográfico que, más al oeste, provoca el aumento de las precipitaciones estivales originando la selva tucumano-oranense (Damario & Pascale, 1980). Es en esta región donde se ubica el polo de calor de América del Sur (Prohaska, 1959) y coincide en su mayor parte con la ecorregión de El Gran Chaco, un bosque semi-deciduo, xerofítico, con predominancia de quebracho colorado (*Schinopsis lorentzii*) y quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*) (Krapovickas & Longhi, 2012).



*Figura 9 – Áreas que cumplen los requerimientos térmicos para cultivo de cáñamo de ciclo largo (verde) y corto (celeste), excluyendo áreas que pueden poner en riesgo la producción por altas temperaturas.*

En segundo lugar, se analizaron los riesgos productivos devenidos por bajas temperaturas en momentos de alta sensibilidad. En este sentido, las plántulas de cáñamo de hasta 4 a 5 pares de hojas pueden soportar heladas de corta duración de hasta  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Grenikov A. S. & Tollochko T. ,1953; Merfield et al., 1999), de ocurrir largos períodos de temperaturas muy bajas en este estadio puede afectar negativamente su crecimiento final. Por esta razón, se recomienda la siembra luego de finalizado el período de heladas primaverales de gran intensidad (Alberta Agriculture and Forestry, 2015). En cuanto a la peligrosidad de las heladas tempranas u otoñales, si bien existen variedades desarrolladas en Finlandia y Rusia que resisten heladas de hasta  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  en cualquier momento de su ciclo (Senchenko & Timonin, 1978; Callaway & Laakkonen, 1996; Callaway, 2002), la gran mayoría de las variedades cultivadas en climas templados, no son resistentes a la ocurrencia de heladas en floración (Grigoryev S., 2000; Clarke & Merlin, 2013).

La gravedad de las heladas durante la etapa de floración fue validada a través del análisis de distintos trabajos de diferentes autores localizados en áreas incluidas dentro



### B. Regiones hídricas

Del análisis de la información climática proveniente de los sitios donde prospera el *Cannabis*, se tuvo en cuenta la misma delimitación del área a estudiar concerniente a los 92 sitios ubicados entre los 22º y 55º de latitud y se observó que dicho cultivo ha prosperado en los más variados lugares con la ayuda del hombre. En el gráfico 2 se muestran las precipitaciones acumuladas del semestre cálido de los sitios nombrados, y allí se observa la gran diversidad de situaciones, encontrando al cultivo desde sitios extremadamente húmedos hasta otros extremadamente áridos.

Con el fin de determinar las necesidades hídricas del cáñamo, Cosentino et al. (2013) realizó un estudio de productividad bajo diferentes situaciones hídricas y determinó que durante el ciclo de cultivo se debe cubrir, como mínimo, el 50% de la ETm (evapotranspiración máxima) para que no haya deficiencias significativas entre la producción de biomasa en comparación con cultivos que satisfacen plenamente la ETm. Incluso, bajo esta última condición, la eficiencia del uso del agua decae notablemente debido a que la disponibilidad excede a las necesidades propias del cultivo.

Por esta razón se elaboró un Índice de Satisfacción Hídrica (ISH%), a través del cual se puede analizar qué porcentaje de la ETm está cubierta por las precipitaciones durante el ciclo de cultivo, en los 92 sitios considerados (Gráfico 3).

Como se observa, de la misma manera que analizando solamente las precipitaciones, el cultivo de *Cannabis* prospera en sitios donde la ETm está cubierta en su totalidad, como así también donde las precipitaciones no llegan a cubrir ni si quiera el 10 % de la ETm. Esto se debe a que en muchos de los sitios analizados el cultivo se realiza bajo riego artificial. Por esta razón, y sin contar con datos certeros de qué sitios riegan sus cultivos y cuáles no, se procedió a realizar el mismo análisis en los 16 sitios muestreados que pertenecen a los lugares de origen de esta especie y a los lugares donde se naturalizó (Gráfico 4).

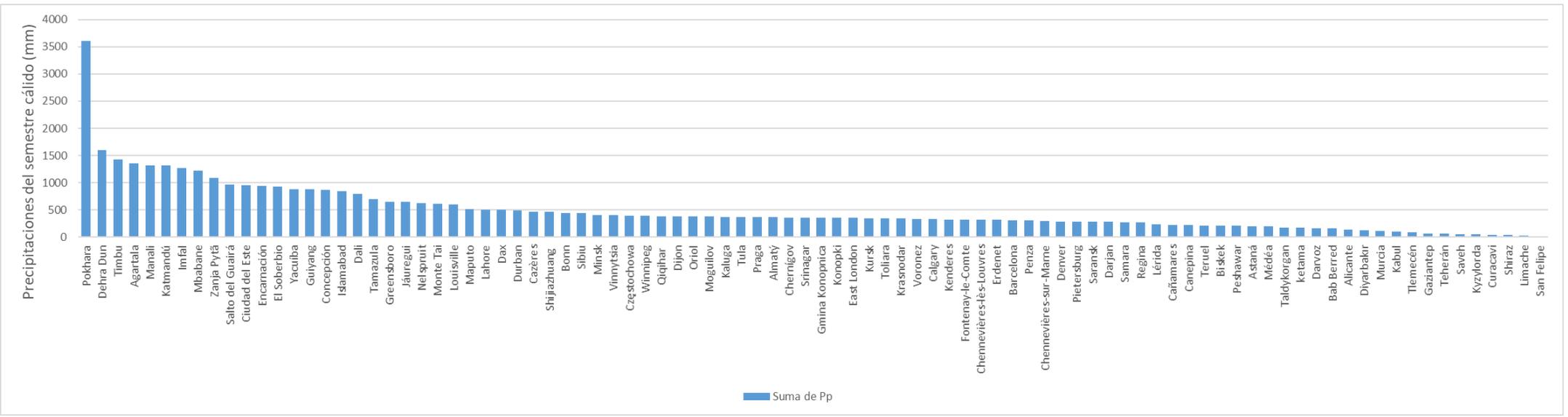


Gráfico 2 – Precipitaciones acumuladas del semestre cálido de los 92 sitios donde prospera el Cannabis entre los 22 y 55° de latitud.

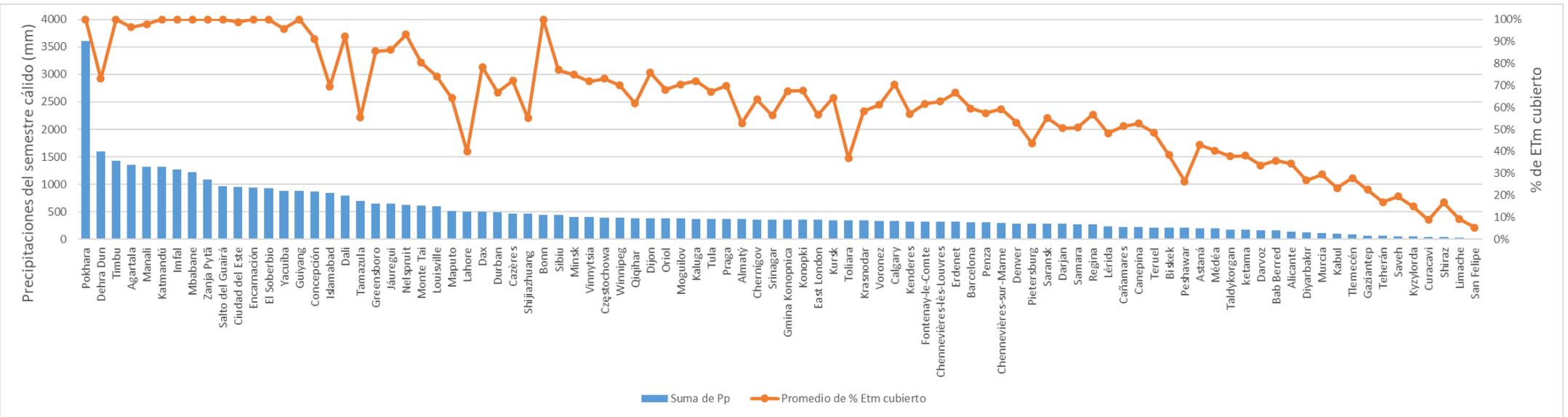


Gráfico 3 – Precipitaciones acumuladas y porcentaje medio de ETm cubierto por las precipitaciones del semestre cálido de los 92 sitios donde prospera el Cannabis entre los 22 y 55° de latitud.

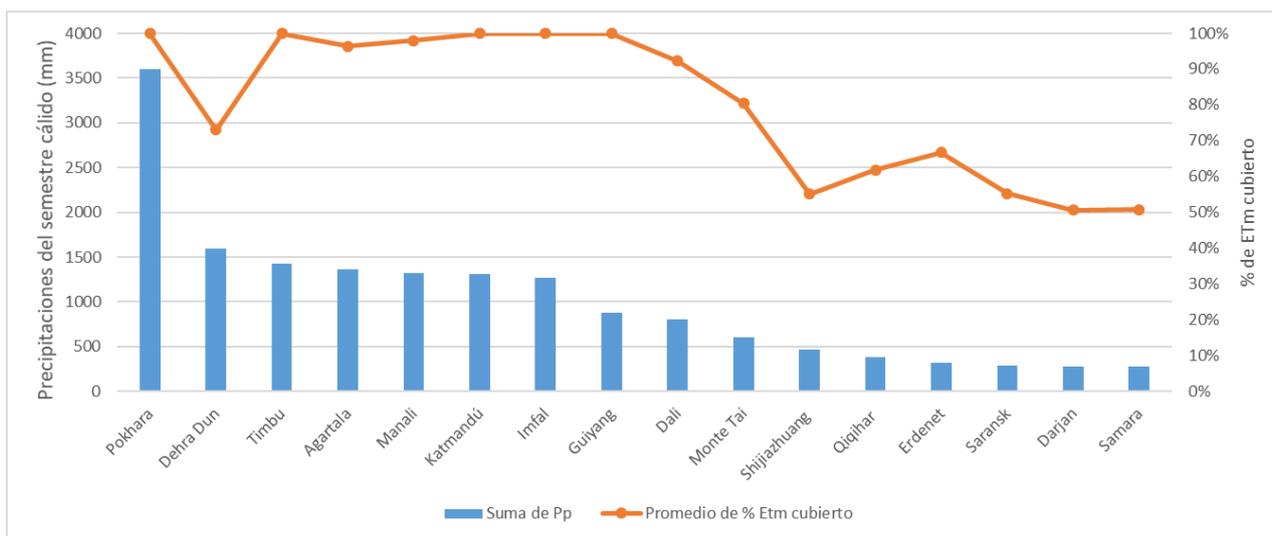


Gráfico 4 – Precipitaciones acumuladas y porcentaje medio de ETm cubierto por las precipitaciones del semestre cálido de los 16 sitios de origen o naturalización del Cannabis.

Como se aprecia, en todos los sitios donde se originó o naturalizó el *Cannabis*, la ETm se encuentra cubierta mínimamente en un 50%, agregando valor a los resultados de Cosentino et al. (2013). Por esta razón, se procedió a zonificar para el territorio argentino aquellos sitios donde la ETm de los meses del semestre cálido se encuentre cubierta al menos en un 50% (ciclo largo) (Figura 12), y sitios donde la ETm de



Figura 12 - Áreas que cumplen los requerimientos hídricos para cultivo de cáñamo de ciclo largo.



Figura 13 - Áreas que cumplen los requerimientos hídricos para cultivo de cáñamo de ciclo corto.

noviembre, diciembre, enero y febrero se encuentre cubierta al menos en un 50% (ciclo corto) (Figura 13).

A continuación, se procedió a analizar la distribución del índice de satisfacción hídrica debido a que el cáñamo requiere de buena humedad edáfica, sobre todo, durante la implantación ya que en dicha etapa el cultivo reporta mayor sensibilidad a la sequía (Clarke & Merlin, 2013; Robinson, 1943; Wright, 1941). Para tal fin, se analizó la distribución del ISH% en los 92 sitios donde se cultiva *Cannabis* ubicados entre las latitudes en las que se encuentra el territorio argentino. Por un lado, la distribución del ISH% en los meses de octubre a marzo (ciclo largo) para aquellos sitios ubicados por debajo de los 40º de latitud (Gráfico 5) y, por otro lado, en los meses de noviembre a febrero (ciclo corto) para aquellos sitios ubicados por encima de los 40º de latitud (Gráfico 6)

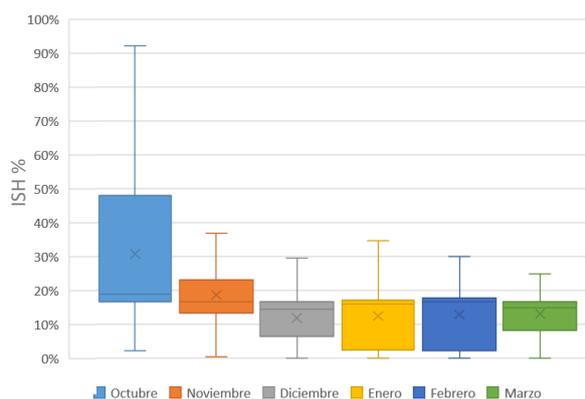


Gráfico 5 – Distribución de la satisfacción hídrica en sitios donde prospera el cultivo de cáñamo de ciclo largo entre los 22 a 40º de latitud

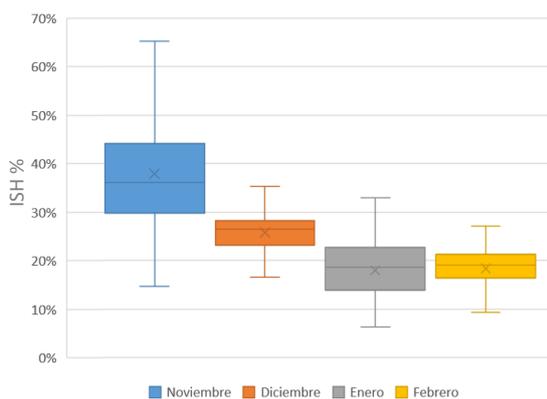


Gráfico 6 – Distribución de la satisfacción hídrica en sitios donde prospera el cultivo de cáñamo de ciclo corto entre los 40 a 55º de latitud

Como se observa en ambos gráficos, el *Cannabis* se encuentra adaptado a sitios donde las necesidades hídricas son satisfechas en mayor proporción durante los primeros meses, correspondientes a la etapa vegetativa, sobre todo en el primer mes de implantación. De aquí se deduce y se confirma que las necesidades hídricas en etapas tempranas del crecimiento y desarrollo del cultivo son las más importantes a ser satisfechas para que dicha especie cumpla su ciclo con normalidad.

De esta forma se procedió a delimitar en el territorio argentino, aquellos sitios que cumplan con las necesidades hídricas básicas antes descriptas, y a su vez se dé que:

**A: en sitios aptos para cultivos de ciclo largo se cumpla:**

%ETm cubierto en Octubre  $\geq$  %ETm cubierto en Noviembre  $\geq$  %ETm cubierto en Diciembre/Enero/Febrero/Marzo (Figura 14)

**B: en sitios aptos para cultivos de ciclo corto se cumpla:**

%ETm cubierto en Noviembre  $\geq$  %ETm cubierto en Diciembre/Enero/Febrero (Figura 15)



Figura 14 - Áreas aptas para el cultivo de cáñamo de ciclo largo contemplando la distribución de las precipitaciones.



Figura 15 - Áreas aptas para el cultivo de cáñamo de ciclo corto contemplando la distribución de las precipitaciones.

Por último, a través de un balance hidrológico climático de la Argentina realizado con las cartas de precipitaciones mensuales y evapotranspiración mensual cedidas por Murphy, se tuvieron en cuenta los excesos hídricos de los meses de febrero y marzo como adversidad condicionante de la producción, debido a los problemas que causan durante la cosecha, como por ejemplo la imposibilidad de ingresar con maquinarias al lote en tiempo y forma a causa de la falta de piso (Taboada et al., 2009), además de elevar las probabilidades de ocurrencia de enfermedades fúngicas habituales en cáñamo como *Botrytis cinerea* y *Sclerotinia sclerotiorum* (Meijer et al. 1995; Cromack, 1998). Para esto, se desestimó las áreas en donde haya excesos durante los meses de febrero

y marzo para la aptitud de variedades de ciclo largo (Figura 16), y solamente se consideraron los excesos de febrero para la zonificación de aptitud de variedades de ciclo corto (Figura 17).

Como se observa, el área que quedó excluida corresponde al noreste del país, en donde en esta época del año, tales excesos se presentan como una seria adversidad agroclimática descrita por Damario & Pascale (2011), produciendo perjuicios de diversa índole, tales como: detención de las maduraciones, aparición de enfermedades criptogámicas, pérdida de calidad de los frutos, atrasos en las cosechas, impedimento para las maquinarias, posible erosión hídrica, etc.



Figura 16 - Áreas aptas para el cultivo cáñamo de ciclo largo excluyendo áreas con excesos hídricos en febrero y marzo.



Figura 17 - Áreas aptas para el cultivo cáñamo de ciclo corto excluyendo áreas con excesos hídricos en febrero.

### C. Regiones fotoperiódicas

Para analizar el fotoperíodo se describió, en primer lugar, el momento en el que el cultivo es sensible a dicho parámetro. Amaducci et al. (2008) estudiaron la dinámica de la floración en cáñamo y concluyeron que existe una fase vegetativa básica, o fase juvenil que no es sensible al fotoperíodo y su duración está ligada a la temperatura ambiente. En siembras tempranas, a bajas temperaturas, esta fase culmina cuando el

fotoperiodo es demasiado largo y no favorable para la floración. Por el contrario, en siembras tardías, la etapa juvenil se completa temprano y la inducción a la floración es favorecida por el progresivo acortamiento del fotoperíodo.

Si bien, no está esclarecido el tiempo térmico exacto de ese período juvenil, se han hecho estudios sobre el fotoperiodo umbral para la floración, y éste resulta cercano a las 14 horas para la mayoría de las variedades de cáñamo industrial / medicinal criados en Europa y América del Norte. Al ser *Cannabis sp.* una especie de días cortos (Ranalli, 2004), la floración se retrasa progresivamente en fotoperiodos mayores a 14 horas (Lisson et al., 2000a) y el retraso es considerable si la duración del día es mayor a 16 horas (Borthwick & Scally, 1954).

De esta situación, parte la necesidad de delimitar tres ambientes en la geografía del territorio argentino:

- El primer ambiente, aquel en el que el fotoperíodo del semestre cálido este siempre cercano o por debajo de valores próximos a las 14 horas, lo que expondría al cultivo a un desarrollo ligado al mínimo valor de tiempo térmico, que resultaría en un cultivo de ciclo corto potencialmente poco productivo (Cromack, 1998; Amaducci et al., 1998; Struik et al., 2000; Sankari & Mela, 1998; Lisson et al., 2000a).

Este ambiente sub optimo se delimitó entre los 22 y 30º de latitud sur (Figura 18 – área amarilla), donde el fotoperíodo del semestre cálido siempre se encuentra con valores menores a 15 horas (Gráfico 7).

- El segundo ambiente, aquel en el haya un período con un fotoperíodo mayor a las 14 horas, suficiente que permita el máximo crecimiento vegetativo del cultivo garantizando una producción sin ponerlo en riesgo ante adversidades meteorológicas, y que la floración se desarrolle en los meses de febrero y marzo.

Este ambiente optimo se delimitó entre los 30 y 42º de latitud sur (Figura 18 – área verde), donde hay un período de entre uno a dos meses donde el

fotoperíodo resulta poco inductivo (mayor a 15 horas) (Gráfico 8) y la máxima inducción ocurre durante febrero y marzo.

- El tercer ambiente, aquel en que el período con un fotoperíodo mayor a las 14 horas sea demasiado largo, y esto resulte en un retraso del momento de la floración más allá del mes de marzo, tal que exponga al cultivo a condiciones meteorológicas adversas. Un claro ejemplo de este caso son los cultivos de cáñamo en países nórdicos donde la introducción de variedades de alto rendimiento criadas en países como Francia, o Italia, con menores amplitudes fotoperiódicas (por estar a menores latitudes), fracasan por no llegar a cumplir el ciclo ontogénico, detenido por heladas letales (Sauli, 1946). A partir de esta situación se han seleccionado cultivares insensibles al fotoperíodo que cumplen su ciclo en un corto plazo (dos meses) pero resultan muy poco productivas en relación a los cultivares de latitudes menores (Pahkala et al., 2008).

Este ambiente no apto para variedades de cáñamo sensibles al fotoperíodo se delimitó entre los 42 y los 55º de latitud sur (Figura 18 – área roja), donde el período con fotoperíodo mayor a 16 horas es de 3 a 4 meses (Gráfico 9) y la floración se vería atrasada hasta momentos en donde las heladas pondrían en serios riesgos la producción (Figura 10).

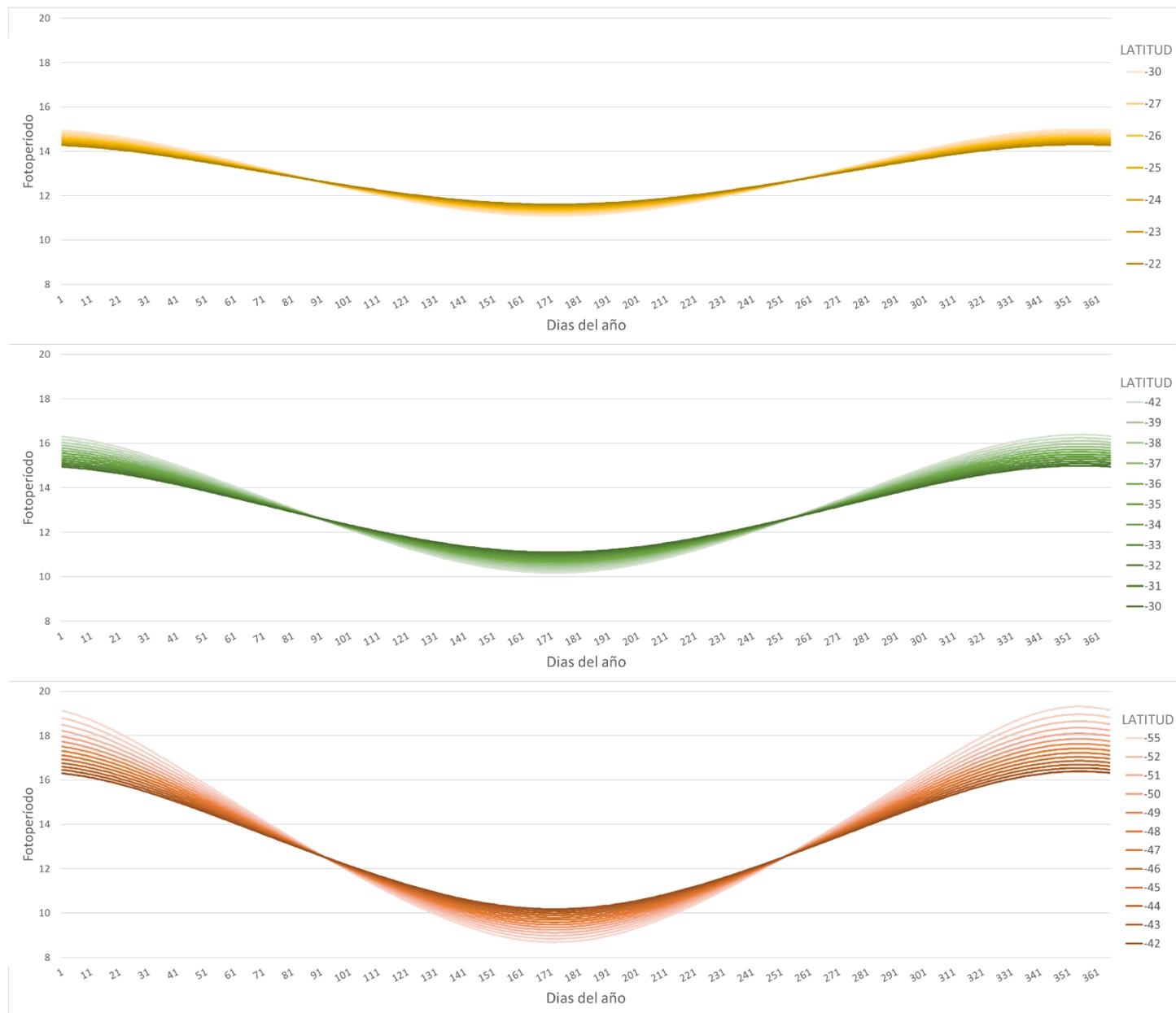
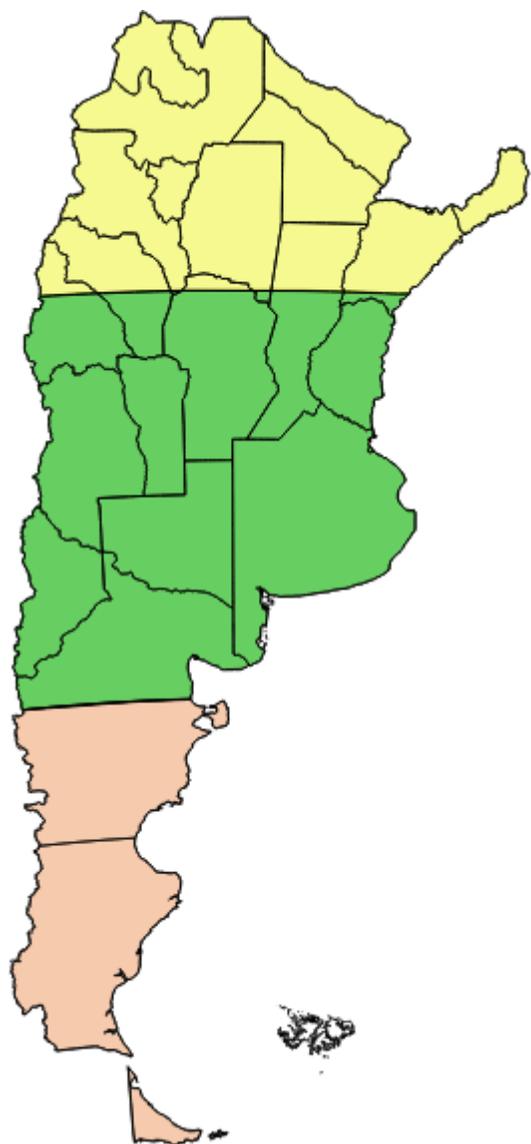


Figura 18 y Gráficos 7, 8 y 9 - En amarillo, áreas con fotoperíodos sub óptimos (el Gráfico 7 describe su amplitud anual según latitud). En verde, áreas con fotoperíodo óptimos (el Gráfico 8 describe su amplitud anual según latitud). Y en rojo áreas con fotoperíodos no aptos para la producción de variedades de cáñamo sensible al fotoperíodo (el Gráfico 9 describe su amplitud anual según latitud).

### 3.2.2 Tipos agroclimáticos de la Argentina para el cultivo de cáñamo

A partir de la superposición de los resultados parciales establecidos por las zonas delimitadas en regiones térmicas, hídricas y fotoperiódicas, se elaboró una carta de tipos agroclimáticos de las áreas de aptitud para el cultivo de cáñamo (Figura 19).

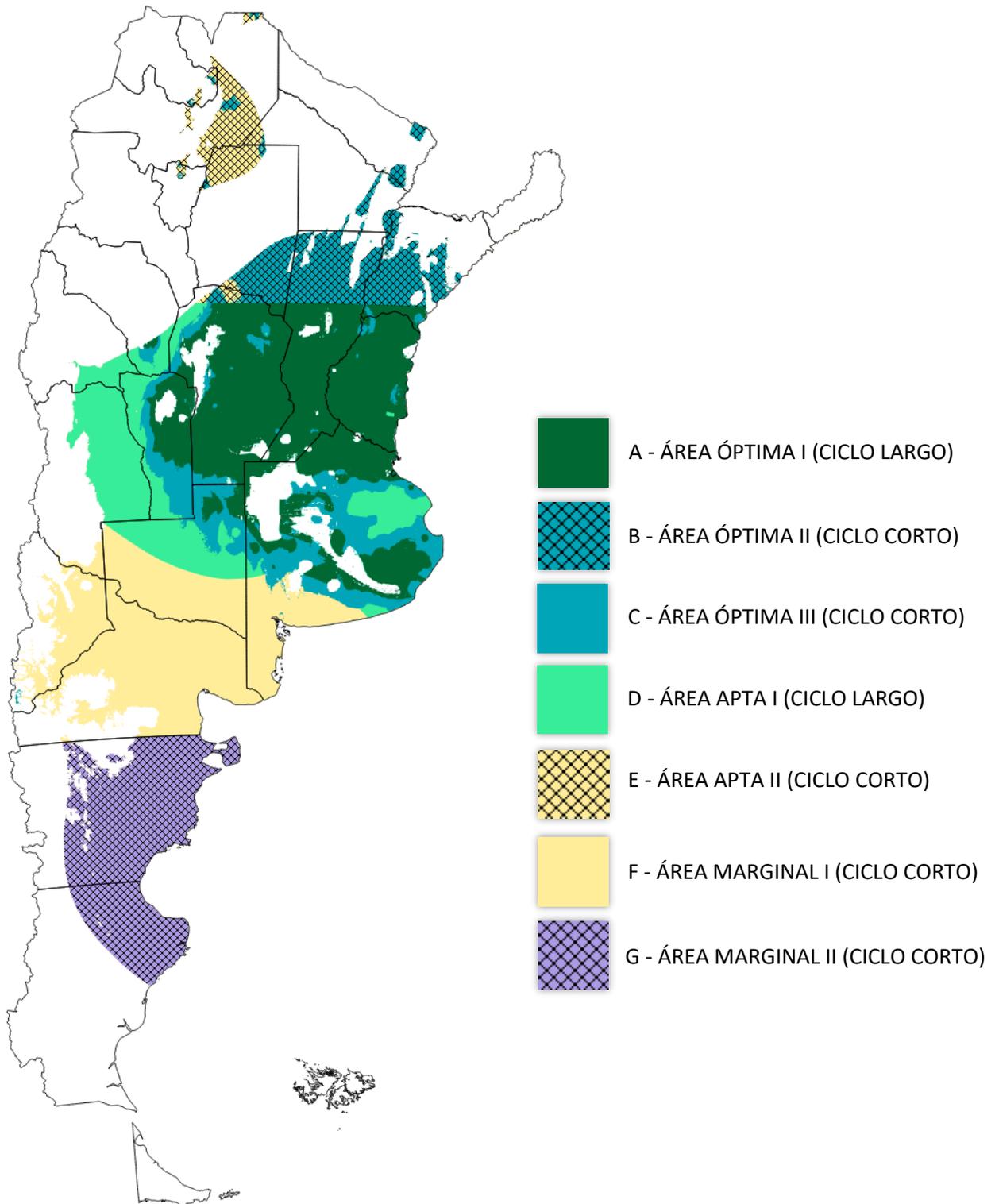


Figura 19 – Tipos agroclimáticos para el cultivo de cáñamo

Como se observa, se pueden distinguir siete zonas que representan áreas óptimas, aptas y marginales, que se detallaran a continuación:

#### A – ÁREA ÓPTIMA I (CICLO LARGO)

Comprende un área donde todos los requerimientos térmicos, hídricos y fotoperiódicos se cumplen para poder llevar a cabo un cultivo de cáñamo de ciclo largo a escala extensiva. En esta zona también se podrían llevar a cabo cultivos de ciclo corto atendiendo a que las variedades a elegir tengan un bajo requerimiento de tiempo térmico o un umbral fotoperiódico mayor a las 14 horas, debido a que el fotoperíodo en esta zona podría extender el ciclo.

#### B – ÁREA ÓPTIMA II (CICLO CORTO)

Comprende un área donde todos los requerimientos térmicos, hídricos y fotoperiódicos se cumplen para poder llevar a cabo un cultivo de cáñamo de ciclo corto a escala extensiva. En esta región no se podrían llevar a cabo cultivos de ciclo largo debido a que el fotoperíodo en estas latitudes acortaría el ciclo, independientemente de la variedad elegida.

#### C – ÁREA ÓPTIMA III (CICLO CORTO)

Comprende un área donde todos los requerimientos térmicos, hídricos y fotoperiódicos se cumplen para poder llevar a cabo un cultivo de cáñamo de ciclo corto a escala extensiva teniendo en consideración la elección de variedades que tengan un bajo requerimiento de tiempo térmico o un umbral fotoperiódico mayor a las 14 horas, debido a que el fotoperíodo podría extender el ciclo. En cuanto a la posibilidad de llevar a cabo un cultivo de ciclo largo, la única condicionante en esta región es que no se lleguen a satisfacer las necesidades hídricas de forma óptima. Sin embargo, considerando la capacidad de esta especie a soportar sequías moderadas (Lisson & Mendham, 1998), se podría considerar esta zona como apta para el cultivo de cáñamo de ciclo largo.

#### D - ÁREA APTA I (CICLO LARGO)

Comprende un área donde los requerimientos térmicos y fotoperiódicos son óptimos para el cultivo de cáñamo de ciclo largo, pero los requerimientos hídricos no se cumplen, determinando la posibilidad de llevar a cabo un cultivo a escala intensiva, con

el uso de un sistema de riego. En esta zona también se podrían llevar a cabo cultivos de ciclo corto bajo la misma modalidad de riego, atendiendo a que las variedades a elegir tengan un bajo requerimiento de tiempo térmico o un umbral fotoperiódico mayor a las 14 horas, debido a que el fotoperíodo en esta zona podría extender el ciclo.

#### E - ÁREA APTA II (CICLO CORTO)

Comprende un área donde los requerimientos térmicos y fotoperiódicos son óptimos para el cultivo de cáñamo de ciclo corto, pero los requerimientos hídricos no se cumplen, determinando la posibilidad de llevar a cabo un cultivo a escala intensiva, con el uso de un sistema de riego. En esta región no se podrían llevar a cabo cultivos de ciclo largo debido a que el fotoperíodo en estas latitudes acortaría el ciclo, independientemente de la variedad elegida.

#### F - ÁREA MARGINAL I (CICLO CORTO)

Comprende un área donde solo los requerimientos térmicos garantizan la posibilidad de un cultivo de ciclo corto. En este caso, se podría llevar a cabo en una escala intensiva, con el uso de un sistema de riego, y atendiendo a que las variedades a elegir tengan un bajo requerimiento de tiempo térmico o un umbral fotoperiódico mayor a las 15 horas, debido a que el fotoperíodo en esta zona podría extender el ciclo. En esta zona no se podrían llevar a cabo cultivos de ciclo largo, debido a que las primeras heladas otoñales condicionan la producción con un alto riesgo en un momento en el que el cultivo es muy vulnerable a esta condición.

#### G - ÁREA MARGINAL II (CICLO CORTO)

Comprende un área donde si bien los requerimientos térmicos garantizan la posibilidad de un cultivo de ciclo corto, el fotoperíodo resulta muy extenso, lo cual determinaría una extensión del ciclo que lo pondría en riesgo por heladas otoñales. En esta área solo es posible el cultivo de variedades insensibles al fotoperíodo, las cuales tienen la capacidad de florecer bajo cualquier condición lumínica en un período de dos a tres meses. Este cultivo debería llevarse a cabo con sistema de riego.

Algunas consideraciones a tener en cuenta:

- La zonificación se llevó a cabo con los datos provenientes del Atlas agroclimático digital de la Argentina para el período 1981-2010 (Murphy, comunicación personal). Dicho atlas está constituido a partir de la información climática proveniente de 135 sitios distribuidos, como muestra la Figura 20, a lo largo y ancho de todo el territorio argentino. La interpolación de los datos provenientes de los diferentes sitios es lo que permite la creación de mapas agroclimáticos. Al ser un país tan grande, la densidad de estaciones meteorológicas no resulta óptima para realizar delimitaciones muy precisas, sobre todo en sitios como la Patagonia o el Noroeste del país, donde la densidad es mucho menor. Es por esto, que los límites propuestos por la presente carta de tipos agroclimáticos, deben considerarse como zonas de transición y resulta pertinente un análisis a escala microclimática en estos sitios.



*Figura 20 – Estaciones meteorológicas utilizadas en el Atlas agroclimático digital de la Argentina (Murphy, 2019).*

- La interpolación de dichas estaciones, ubicadas en su gran mayoría a niveles cercanos a los del nivel del mar, hace que los valores resultantes en áreas montañosas no sean siempre correctos. Por lo que el presente estudio se llevó a cabo para el territorio argentino por debajo de los 1000 metros sobre el nivel del mar, dejando sin considerar gran parte del territorio como se muestra en la Figura 21. En dicho territorio

se encuentran, por ejemplo, las sierras de San Luis y las de Córdoba que, como se observa en la figura 19, están rodeadas por áreas óptimas para el cultivo de cáñamo. Por lo que resulta importante no descartar dichos sitios, ya que, en muchas partes del mundo, el *Cannabis* se cultiva en altura. Asimismo, refuerza la necesidad de un análisis a una menor escala para no descartar sitios potencialmente aptos u óptimos.



Figura 21 – En verde, zonas no contempladas en la zonificación por tipos agroclimáticos del cáñamo

- Las delimitaciones sucesivas que resultaron en la carta de aptitud de cultivo de cáñamo fueron realizadas con información climática. Esto quiere decir, que son datos medios que conllevan una variabilidad intrínseca proveniente de la ponderación de 30 años de datos. Es por esto que los límites, desde un punto de vista meteorológico, pueden variar sensiblemente año tras año.
- Las delimitaciones propuestas son representativas de los estudios climatológicos llevados a cabo para el período 1980-2010. Esto quiere decir, que ante un escenario de cambio climático, resulta necesario que estas sean actualizadas en la medida que los estudios de los elementos meteorológicos en la Argentina muestren variaciones persistentes.

- Las áreas de cultivo propuestas contemplan solamente el factor climático. Resulta necesario un estudio edafológico para validar un determinado lugar, antes de realizar el cultivo.

- Para el presente trabajo se tomaron como representativos las principales variedades de cáñamo que se producen actualmente en Europa. Cabe decir, que como se mencionó anteriormente, existen variedades mejoradas que resisten heladas y sequias, como así también variedades insensibles al fotoperíodo, lo cual, con la correcta elección del cultivar, es muy probable que los límites propuestos por el presente trabajo sean más amplios que los sugeridos.

- Las delimitaciones propuestas están orientadas al correcto desenvolvimiento del cultivo de cáñamo, éstas pueden ser usadas con fines medicinales o industriales. Sin embargo, para un cultivo con fines netamente medicinales se detallará a continuación la zonificación propia para el caso.

### 3.2.3 Regiones óptimas para la producción de principios activos de interés medicinal

Como se explicó anteriormente, los principios activos de interés medicinal en el *Cannabis* se hallan en los tricomas, y éstos se encuentran en mayor proporción en las inflorescencias femeninas (Clarke & Merlin, 2013). Los cultivos en general se hallan fuertemente influenciados por su ambiente y manejo cultural durante su ciclo de vida, y el mismo tipo de influencia se aplica en la producción total de cannabinoides durante ese ciclo (Mandolino et al., 2003; Hazekamp & Fishedick, 2012). Por esta razón se procedió a continuar con el análisis y la delimitación del territorio, apuntando a una producción de cannabinoides en un cultivo de alto valor y con una calidad de grado medicinal, a partir de la zonificación previa de sitios que, en primer término, hayan calificado como óptimos para el cultivo de cáñamo, tanto de variedades de ciclo corto

como de ciclo largo teniendo en cuenta las necesidades térmicas, hídricas y fotoperiódicas (Figura 22).

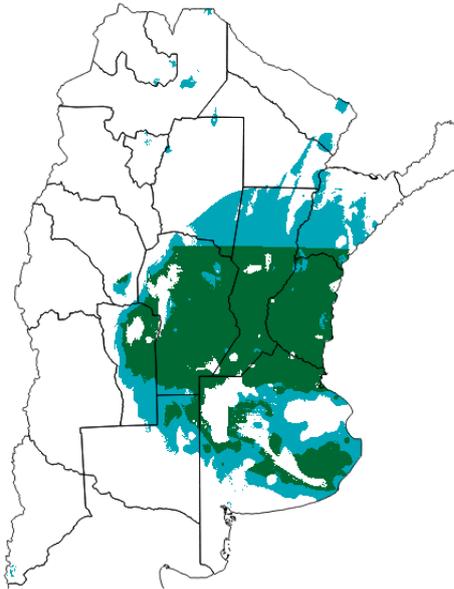
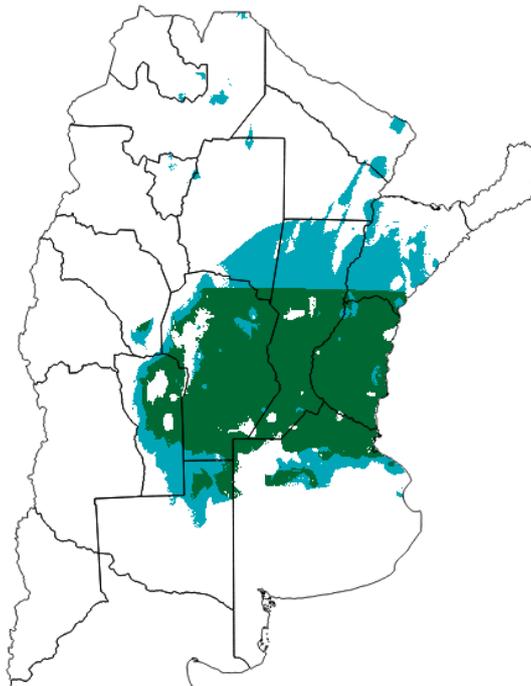


Figura 22 – En verde, zonas óptimas para el cultivo de ciclo largo y, en azul, zonas óptimas para el cultivo de ciclo corto

Del análisis de la temperatura óptima para el cultivo de cáñamo, teniendo en cuenta la mayor tasa de fotosíntesis y producción de cannabinoides, numerosos estudios fijan un rango de 20 a 30 °C dependiendo la variedad de origen (Bazzaz et al., 1975; Chandra et al., 2008, 2010, 2011). Algunos autores han registrado también las condiciones de cultivo de *Cannabis* para el comercio ilícito en los Países Bajos y Bélgica, realizados bajo la modalidad “Indoor”, es decir “a puertas a dentro”, con el control total del medioambiente (luz artificial, ventilación forzada, temperatura, humedad constante, etc.). A partir de estos trabajos se observó que los cultivadores mantienen la temperatura constante entre 25 a 30°C (Vanhove et al., 2011; Potter & Duncombe, 2012; Chandra et al., 2017a). Por último, se tuvo como principal referencia el trabajo de Chandra et al. (2017b) en el que registra las condiciones de cultivo en Estados Unidos y el Reino Unido para la producción de *Cannabis* de grado medicinal, fijando la temperatura en 25 °C.

A partir de lo expuesto, se procedió a delimitar dentro del área óptima para el cultivo de cáñamo, aquellos sitios con temperaturas medias entre 20 y 30 °C durante los meses de febrero y marzo, que corresponden a la etapa de floración, donde dichos parámetros serán más determinantes en la producción (Figura 23).



*Figura 23 – Zonas óptimas para el cultivo de cáñamo con temperaturas medias en floración entre 20 y 30 °C.*

En cuanto a la disponibilidad hídrica, Sikora et al. (2011) observaron que cuando las precipitaciones acumulan cantidades mayores a 350 mm durante el ciclo del cultivo, la concentración de metabolitos secundarios decrece. Muchos trabajos publicados han descrito la influencia positiva de condiciones de estrés en la producción de cannabinoides y terpenos (Bouquet, 1950; Pate, 1983; Lydon et al., 1987; Sikora et al., 2011). Si bien no hay una verdad absoluta en cuanto a la razón de ser de los cannabinoides en esta especie, se ha advertido en diferentes trabajos que sirven como agentes que reducen la desecación (Bouquet, 1950; De Faubert Maunder, 1976; Sharma, 1975; Paris et al., 1975; Murari et al., 1983; Hakim et al., 1986; Latta & Eaton, 1975), tienen propiedades antimicrobiales (Ferenczy et al., 1958; Kabelik et al., 1960; Radošević et al., 1962; ElSohly et al., 1982; Farkas & Andrassy, 1976; Gal & Vajda, 1970; Van Klingerén & Ten Ham, 1976), son repelentes de insectos (Bouquet, 1950; Khare et al.,

1974; Rothschild & Fairbairn, 1980; Ledbetter & Krikorian, 1975) y sirven de protector ante la radiación UV-B (Pate, 1983; Lydon, 1986; Lydon et al., 1987; Sikora et al., 2011), por lo que se concluye que la producción de estos metabolitos secundarios resulta una ventaja para la adaptación en situaciones que amenazan la supervivencia. Todos estos estudios refuerzan la teoría del balance entre crecimiento – defensa (Herms & Mattson, 1992). En general, la defensa es asumida como “la razón de ser” de los metabolitos secundarios (Fraenkel, 1959; Whittaker & Feeny, 1971; Levin, 1976; Swain, 1977; McKey, 1979; Rhodes, 1985; Williams et al., 1989; Harborne, 1990).

Tomando como base el estudio de Sikora et al. (2011) se procedió a calcular el ISH% que representan 350 mm en la región de estudio. Debido a que el trabajo no aclara como fue la distribución de las precipitaciones ni la evapotranspiración potencial del sitio (Novi Sad, Serbia), se buscó en la bibliografía trabajos de esa misma época, en el mismo instituto, que hayan registrado datos de precipitación y temperatura. A partir del trabajo de Pejić, B. et al., (2009), “*Effect of water stress on yield and evapotranspiration of sunflower*”, se pudo determinar que, en esa región, 350 mm de precipitación corresponden a un ISH% del 57%. Este valor tiene coherencia con lo explicado anteriormente y concuerda con el trabajo de Cosentino et al. (2013). Posteriormente, se procedió a delimitar la región resultante del apartado anterior con valores de ISH% entre 50 a 70% (Figura 24) para así acotar la zonificación sobre un área que tenga una

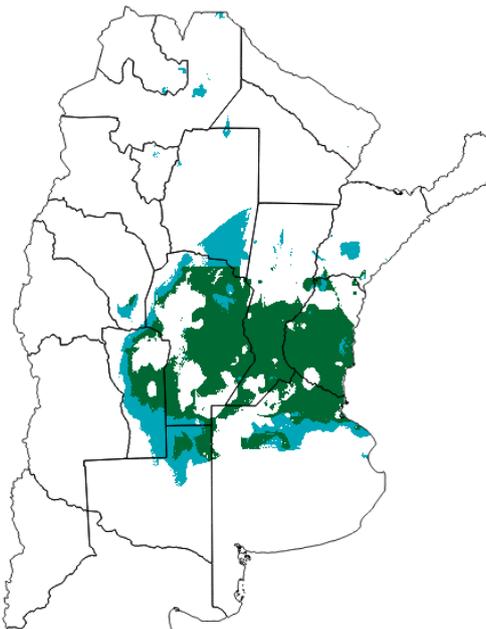
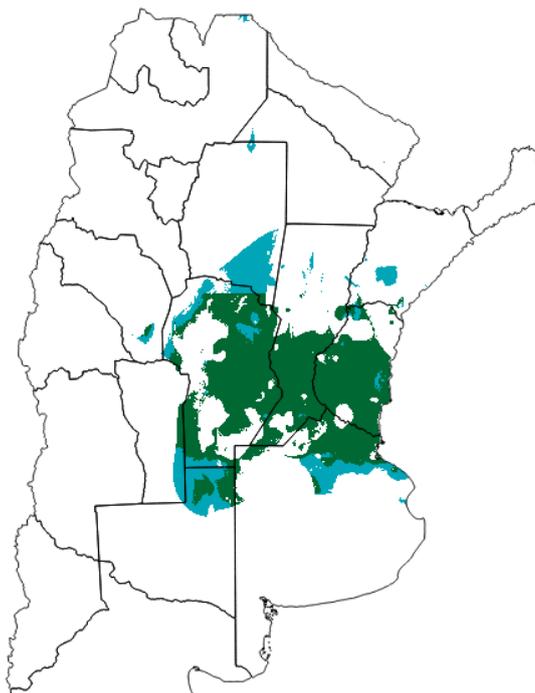


Figura 24 – Zonas óptimas para el cultivo de cáñamo con temperaturas e ISH% óptimas para la producción de cannabinoides.

leve restricción hídrica que resulte en un mínimo estrés y favorezca la producción de cannabinoides.

Otro de los elementos del clima a considerar para la producción de principios activos de interés medicinal es la humedad relativa del aire ya que ésta también afecta la producción de resina en los tricomas (Bazzaz et al., 1975; Sikora et al., 2011). En los trabajos citados sobre la temperatura óptima para la mayor tasa de fotosíntesis y producción de cannabinoides, también se registró la humedad ambiental, la cual fue mantenida siempre entre 50 y 60% de humedad relativa (Chandra et al., 2008, 2010, 2011, 2017a). Si bien estudios anteriores mostraron que el cáñamo crece mejor con valores de humedad relativa entre 40 y 80% (Frank, 1988), valores muy altos podrían aumentar el riesgo de proliferación de ciertos hongos patógenos, por lo tanto, el rango óptimo se delimitó entre 45 y 65%, durante los meses de febrero y marzo, que corresponden a la etapa de floración (Figura 25).



*Figura 25 – Zonas óptimas para el cultivo de cáñamo con temperaturas, ISH% y humedad relativa óptimas para la producción de cannabinoides.*

A continuación, se tuvo en cuenta la influencia de la radiación en la producción de cannabinoides. Como se dijo anteriormente, en muchas plantas, la producción de metabolitos secundarios es potenciada por situaciones de estrés (Herms & Mattson, 1992), la luz ultravioleta (UV) interfiere en el metabolismo y reproducción celular, causando daño a nivel de ácidos nucleicos y proteínas (Pate, 1983). Zhang & Björn (2009) estudiaron el efecto de la luz ultravioleta en la producción de cannabinoides, comprobando la relación positiva entre la exposición a UV-B (280 – 315 nm según la clasificación de Coblenz (Meyer & Seitz, 1942)) y la producción de THC en hojas jóvenes e inflorescencias. Anteriormente, Lydon (1986) y Lydon et al. (1987) encontraron esta misma relación lineal entre la concentración de THC y la exposición a UV-B, y Pate (1983) concluyó que la producción de THC es un mecanismo de protección que desarrolló el *Cannabis* por el daño causado por la luz UV-B. Cabe destacar que Zhang & Björn (2009) determinaron que la mayor producción de THC va en detrimento a la producción de CBD. Esto se debe a que tanto el THC como el CBD comparten el mismo precursor, el Cannabigerol (CBG) (Small, 2015). Por lo que el siguiente mapa se realizó a partir de la anterior delimitación (Figura 25) y muestra el gradiente de exposición a radiación global (la radiación UV se puede interpretar como el 7,8% de la radiación global (Murphy & Hurtado, 2013)) resultado de la sumatoria de la radiación global febrero y marzo, período que corresponde a la etapa de floración, donde se da la mayor producción de

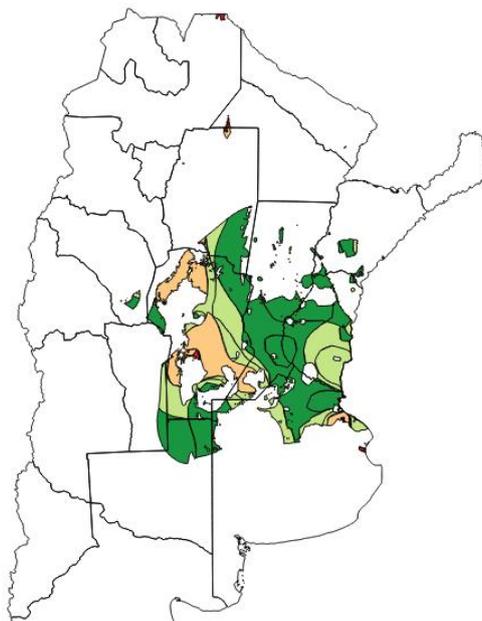


Figura 26 – Gradiente de radiación recibida en el área óptima para la producción de cannabinoides. En verde, máxima radiación recibida; en naranja, mínima radiación recibida.

tricomas (Figura 26). Dicha delimitación será tomada en cuenta dependiendo de los objetivos de producción. Los colores verdes oscuros indican mayor radiación recibida, implicando una mayor producción de THC en términos relativos y con respecto a las áreas definidas con los colores naranjas, que indican el extremo opuesto, zonas con menor radiación recibida, lo que implica una producción orientada a niveles más equilibrados entre THC/CBD.

Como se observa en la figura 27 las áreas óptimas para el cultivo de cáñamo con fines medicinales se encuentran comprendidas entre la provincia de Córdoba, sureste de Santiago del Estero, centro y sur de Santa Fe, Entre Ríos, norte de Buenos Aires y norte de La Pampa. El mapa "A" muestra en azul las áreas óptimas para ciclo corto y en verde para ciclo largo. En el mapa "B" los colores verdes oscuros representan la mayor radiación recibida, lo que determinaría que el ratio de THC/CBD en una producción con fines medicinales esté más orientada al THC. Por el contrario, las zonas naranjas reciben, en comparación, menor radiación y el ratio de THC/CBD sería, en términos relativos, más equilibrado.

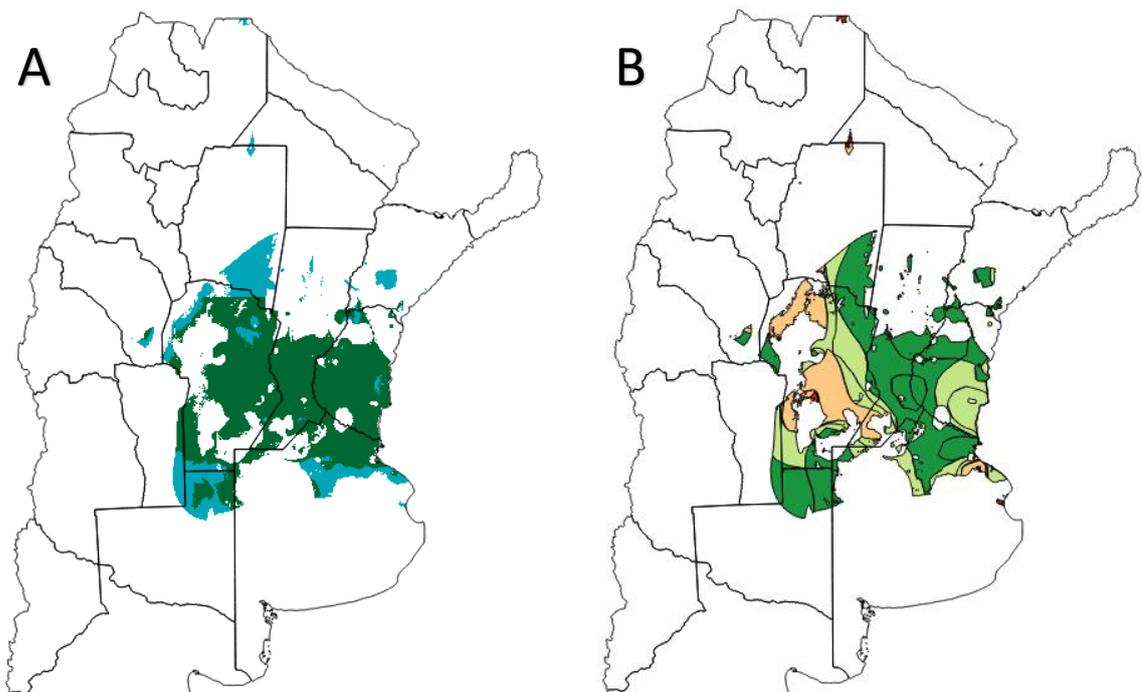


Figura 27 – Zona óptima para la producción de cannabinoides. El mapa "A" muestra diferentes fechas de siembra y ciclos de cultivo, el mapa "B" la diferente irradiación solar.

Algunas consideraciones a tener en cuenta:

- Las delimitaciones actuales se realizaron con la misma metodología que para las delimitaciones de aptitud del cultivo. Por lo que es importante tener en cuenta las mismas consideraciones en cuanto a los límites propuestos.

- Las delimitaciones propuestas entre la zona óptima para el cultivo de cáñamo (Figura 17) y la actual región óptima para la producción de principios activos de interés medicinal (Figura 24) surgen de evaluar qué sitios de nuestro país poseen características climáticas similares a las condiciones ambientales encontradas en un invernadero que produce *Cannabis* de grado medicinal. Sin embargo, la producción de cannabinoides por parte de la planta se dará siempre y cuando el cultivo llegue satisfactoriamente a la etapa de floración. Por lo que, pese a que la presente carta muestra la región óptima para la producción de principios activos de interés medicinal, se podría considerar como zona apta, el resto de la zona óptima para el cultivo de cáñamo resultante del anterior apartado (Figura 17).

- Las delimitaciones actuales contemplan un sistema de producción extensivo, en el cual el ambiente mismo cubriría todas las necesidades térmicas, hídricas y fotoperiódicas. Dado que, en el mundo entero, la producción con fines medicinales se produce casi en su totalidad de manera intensiva, el área a tener en cuenta para dicha producción podría ser varias veces superior con inversiones en riego o invernaderos.

- En cuanto al cultivo con fines medicinales propiamente dicho, el momento de cosecha de las inflorescencias depende del cannabinoide específico que se esté buscando y del quimiotipo empleado en el cultivo<sup>4</sup>. Teniendo en consideración los principales cannabinoides (THC, CBD y CBG), se resalta que, si se busca producir THC, se debe tener presente que se produce una degradación de la molécula a CBN en planta si se cosecha tarde (Russo, 2007) y el momento propicio se encuentra alrededor de la novena semana de floración. Las otras moléculas, no sufren dicha degradación, pero si una descarboxilación por exposición a la luz y a la temperatura (Aizpurua-Olaizola et al., 2014). La transformación de las formas ácidas de los cannabinoides a sus formas

---

<sup>4</sup> Los quimiotipos son las diferentes variedades de *Cannabis* diferenciadas por el ratio de THC/CBD. Los principales quimiotipos son los “drug-type”, o quimiotipo I con alta preponderancia de THC, “fiber-type” o quimiotipo III, con valores muy bajos de THC, y los valores intermedios se denominan quimiotipo II (Pacífico et al., 2008).

descarboxiladas hacen que los efectos secundarios como la psicoactividad sean más pronunciados (Hospodor, 2015). Por lo que la cosecha no debería demorarse mucho más de la semana de floración número once (Aizpurua-Olaizola et al., 2016).

- Para validar las áreas y parámetros propuestos por el presente trabajo, se compararon los índices evaluados con la información climática proveniente de la University of Mississippi Marijuana Research Facility (Oxford, MS 38655, Estados Unidos), donde se produce *Cannabis* de grado medicinal en condiciones extensivas. Se pudo comprobar que los índices térmicos, hídricos y fotoperiódicos exigidos en el presente trabajo se cumplen para esa determinada región. Ver ANEXO II.

#### 4. CONCLUSIONES

A partir de los conocimientos y avances científicos actuales, recopilando información climática y bibliográfica, trabajando con softwares estadísticos y sistemas de información geográfica fue posible, en primer lugar, establecer en la Argentina zonas agroclimáticamente aptas para la producción de cáñamo con ciclos que terminen en plena floración. En segundo lugar, estudiando las condiciones establecidas en la bibliografía científica para la optimización de la producción de cannabinoides en condiciones controladas o semicontroladas, se ha llevado a cabo un refinamiento de la zonificación agroclimática para así delimitar una región que potencie la producción de los principios activos de interés medicinal que produce el *Cannabis*.

El presente trabajo de zonificación de la aptitud agroclimática para el cultivo de cáñamo en el territorio argentino, resulta una herramienta útil para la aplicación de futuras leyes que regulen su producción con fines medicinales o industriales, y la propicien en zonas adecuadas para la optimización de la expresión genotipo-ambiente.

## 5. REFLEXIONES PARA FUTUROS ESTUDIOS

Pese a que el fundamento para la presente zonificación tiene sus bases en experiencias prácticas descritas en la bibliografía científica disponible, resulta necesario evaluar los resultados a través de estudios de ensayos geográficos y siembras continuadas a lo largo del territorio argentino. De esta forma se complementarían los resultados teóricos y así podría darse, a este trabajo, una dimensión más experimental.

En cuanto a la zonificación con vistas a la producción de un metabolito secundario no tiene precedente, es allí donde resulta más necesario realizar un ensayo in situ para evaluar si los supuestos teóricos tienen un vínculo real con la práctica.

Al revisar la bibliografía, como se dijo antes, la mayor parte de la ciencia se dedicó a estudiar el cáñamo en su faceta industrial o textil. Han sido otras ramas de la ciencia los que han estudiado al *Cannabis* en su lado medicinal. Sin embargo, al fin de cuentas, es un cultivo y resulta pertinente que haya más estudios agronómicos actualizados y orientados a establecer las normas y cuidados de una plantación que se convertirá en un medicamento.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- **Aizpurua-Olaizola, O., Omar, J., Navarro, P., Olivares, M., Etxebarria, N. & Usobiaga, A.** (2014). Identification and quantification of cannabinoids in *Cannabis sativa* L. plants by high performance liquid chromatography-mass spectrometry. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 406(29), 7549-7560.
- **Aizpurua-Olaizola, O., Soydaner, U., Öztürk, E., Schibano, D., Simsir, Y., Navarro, P., ... & Usobiaga, A.** (2016). Evolution of the cannabinoid and terpene content during the growth of *Cannabis sativa* plants from different chemotypes. *Journal of natural products*, 79(2), 324-331.
- **Alberta Agriculture and Forestry** (2015). Industrial Hemp Enterprise. Agdex 153/830-1
- **Amaducci, S., Colauzzi, M., Zatta, A. & Venturi, G.** (2008). Flowering dynamics in monoecious and dioecious hemp genotypes. *Journal of Industrial hemp*, 13(1), 5-19.
- **Amaducci, S., Colauzzi, M., Bellocchi, G., Cosentino, S. L., Pahkala, K., Stomph, T. J., ... & Venturi, G.** (2012). Evaluation of a phenological model for strategic decisions for hemp (*Cannabis Sativa* L.) biomass production across European sites. *Industrial Crops and Products*, 37(1), 100-110.
- **Anwar, F., Latif, S. & Ashraf, M.** (2006). Analytical characterization of hemp (*Cannabis sativa*) seed oil from different agro-ecological zones of Pakistan. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 83(4), 323-329.
- **Bazzaz, F. A., Dusek, D., Seigler, D. S. & Haney, A. W.** (1975). Photosynthesis and cannabinoid content of temperate and tropical populations of *Cannabis sativa*. *Biochemical Systematics and Ecology*, 3(1), 15-18.
- **Bócsa, I. & Karus, M.** (1998). The cultivation of hemp: botany, varieties, cultivation and harvesting. Hemptech.
- **Bouquet, R. J.** (1950). *Cannabis*. *Bull Narc*, 2(4), 14-30.
- **Borthwich, H.A. & Scally, N.J.** (1954). Photoperiodic responses of hemp. *The Botanical Gazette* 116(1): 14-29.
- **Burgos, J. J.** (1958). Tipos agroclimáticos para el cultivo de la Palma datilífera en la RA Congreso Frutícola Argentino.
- **Callaway, J. C. & Laakkonen, T. T.** (1996). Cultivation of *Cannabis* oil seed varieties in Finland. *Journal of the International Hemp Association*, 3(1), 32-34.

- **Callaway, J. C.** (2002). Hemp as food at high latitudes. *Journal of Industrial Hemp*, 7(1), 105-117.
- **Chandra, S., Lata, H., Khan, I. A. & Elsohly, M. A.** (2008). Photosynthetic response of *Cannabis sativa* L. to variations in photosynthetic photon flux densities, temperature and CO<sub>2</sub> conditions. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 14(4), 299-306.
- **Chandra, S., Lata, H., Khan, I. A. & Elsohly, M. A.** (2010). Propagation of elite *Cannabis sativa* for the production of D9-Tetrahydrocannabinol (THC) using biotechnological tools. *Medicinal plant biotechnology*, 98-114.
- **Chandra, S., Lata, H., Khan, I. A. & Elsohly, M. A.** (2011). Temperature response of photosynthesis in different drug and fiber varieties of *Cannabis sativa* L. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 17(3), 297.
- **Chandra, S., Lata, H., Khan, I. A. & Elsohly, M. A.** (2017a). *Cannabis sativa* L.: botany and horticulture. In *Cannabis sativa* L.-Botany and Biotechnology (pp. 79-100). Springer, Cham.
- **Chandra, S., Lata, H., Elsohly, M. A., Walker, L. A. & Potter, D.** (2017b). *Cannabis* cultivation: methodological issues for obtaining medical-grade product. *Epilepsy & Behavior*, 70, 302-312.
- **Clarke, R.** (1997). Hanf - Botanik, Anbau, Vermehrung und Züchtung (Hemp - botany, cultivation, propagation and breeding). AT, Aarau, Switzerland.
- **Clarke, R.** (1999). Chapter 1: Botany of the Genus *Cannabis*. En: P. Ranalli (Ed.), *Advances in Hemp Research*. New York, USA: Food Products Press.
- **Clarke, R. & Merlin, M.** (2013). *Cannabis: Evolution and Ethnobotany*. ISBN 978-0-520-27048-0.
- **Cosentino, S. L., Testa, G., Scordia, D. & Copani, V.** (2012). Sowing time and prediction of flowering of different hemp (*Cannabis sativa* L.) genotypes in southern Europe. *Industrial Crops and Products* 37, 20– 33.
- **Cosentino, S. L., Riggi, E., Testa, G., Scordia, D. & Copani, V.** (2013). Evaluation of European developed fibre hemp genotypes (*Cannabis sativa* L.) in semi-arid Mediterranean environment. *Ind. Crops Prod.* 50, 312–324.

- **Cromack, H. T.** (1998). The effect of cultivar and seed density on the production and fibre content of *Cannabis sativa* in southern England. *Industrial Crops and Products*, 7(2-3), 205–210.
- **Damario, E. A. & Pascale, A. J.** (1980). Intensidad y variabilidad de las temperaturas extremas en la argentina. *Rev. Facultad de Agronomía*, 1 (3): 121-132.
- **Damario, E. A. & Pascale, A. J.** (2011). Cartas agroclimáticas de las regiones Pampeana, Chaqueña y Litoral de cultivo en secano [1941-1990]. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 31 (3): 65-183.
- **De Candolle, A.** (1967). *Origin of Cultivated Plants*. New York: Hafner.
- **De Faubert Maunder, M. J.** (1976). The forensic significance of the age and origin of *Cannabis*. *Medicine, Science and the Law*, 16(2), 78-90.
- **De Meijer, E. P. M. & Keizer, L. C. P.** (1994). Variation of *Cannabis* for phenological development and stem elongation in relation to stem production. *Field Crops Research*, 38(1), 37-46.
- **Dewey, L. H.** (1914). Hemp. *Yearbook of the U.S. Dept. Agric.* 1913. 283-346.
- **Di Bari, V., Campi, P., Colucci, R. & Mastroilli, M.** (2004). Potential productivity of fibre hemp in southern Europe. *Euphytica*, 140(1-2), 25-32.
- **Dzyubenko, N. I. & Dzyubenko, E. A.** (2009). 2003-2009 Project Interactive Agricultural Ecological Atlas of Russia and Neighboring Countries. *Economic Plants and their Diseases, Pests and Weeds*.
- **ElSohly, H. N., Turner, C. E., Clark, A. M. & ElSohly, M. A.** (1982). Synthesis and antimicrobial activities of certain cannabichromene and cannabigerol related compounds. *Journal of pharmaceutical sciences*, 71(12), 1319-1323.
- **ElSohly, M. A. & Slade, D.** (2005). Chemical constituents of marijuana: the complex mixture of natural cannabinoids. *Life sciences*, 78(5), 539-548.
- **Escohotado, A.** (2002). *Historia general de las drogas*. Espasa.
- **Farkas, J. & Andrassy, E.** (1976). The sporostatic effect of cannabidiolic acid. *Acta Alimentaria Academiae Scientiarum Hungaricae*, 5(1), 57-67.
- **Fassio, L., Rodríguez, M. J. & Ceretta, S. C.** (2013). Cáñamo (*Cannabis sativa* L.). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). *Boletín de divulgación*, (103).

- **Faux, A. M., Draye, X., Lambert, R., d'Andrimont, R., Raulier, P. & Bertin, P.** (2013). The relationship of stem and seed yields to flowering phenology and sex expression in monoecious hemp (*Cannabis sativa* L.). *European journal of agronomy*, 47, 11-22.
- **Ferenczy, L., Gracza, L. & Jakobey, I.** (1958). An antibacterial preparatum from hemp (*Cannabis sativa* L.). *Naturwissenschaften*, 45(8), 188-188.
- **Fraenkel, G. S.** (1959). The raison d'etre of secondary plant substances. *Science*, 1466-1470.
- **Frank, M.** (1988). *Marijuana Grower's Insider's Guide*. Red Eye Press, Los Angeles, CA. 371 pp.
- **Gal, I. E. & Vajda, O.** (1970). Influence of cannabidiolic acid on microorganisms. *Elelmez. Ipar*, 23, 336-339.
- **Gaoni, Y. & Mechoulam, R.** (1964) Isolation, Structure, and Partial Synthesis of an Active Constituent of Hashish. *Journal of the American Chemical Society* 86 (8), 1646-1647.
- **García-Tejero I. F., Morón, M., Pérez-Álvarez, R., Casano, S., Durán-Zuazo, V. H., Hernández, A. & Muriel-Fernández, J. L.** (2014) Impact of Plant Density and Irrigation on Yield of Hemp (*Cannabis sativa* L.) in a Mediterranean Semi-arid Environment. *J. Agr. Sci. Tech.* Vol. 16: 887-895
- **Grenikov A. S. & Tollochko T.** (1953). *Cultivation of hemp [in Russian]*. Moscow, USSR: State Editors of Agricultural Literature. 447 pp
- **Grigoryev S.** (2000). Evaluation of cold-resistance of hemp. Krasnodar.
- **Hakim, H. A., El Kheir, Y. M. & Mohamed, M. I.** (1986). Effect of the climate on the content of a CBD-rich variant of *Cannabis*. *Fitoterapia*.
- **Harborne, J. B.** (1990). Constraints on the evolution of biochemical pathways. *Biol. J. Linn. Soc.*, 39:135-151.
- **Hazekamp, A. & Fishedick, J. T.** (2012). *Cannabis*-from cultivar to chemovar. *Drug testing and analysis*, 4(7-8), 660-667.
- **Herms, D. A. & Mattson, W. J.** (1992). The dilemma of plants: to grow or defend. *The quarterly review of biology*, 67(3), 283-335.
- **Hospodor, A. D.** (2015). *Controlled Cannabis decarboxylation*. U.S. Patent No. 8,980,941. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

- **Hou, J. P.** (1977). The development of Chinese herbal medicine and the Pen-ts' ao. *The American Journal of Chinese Medicine*, 5(02), 117-122.
- **Kabelik, J., Krejci, Z. & Santavy, F.** (1960). *Cannabis* as a medicament. *Bull Narc*, 12(3), 5-23.
- **Kaplan, J.** (1969). *Marijuana: Report of the Indian Hemp Drugs Commission 1893–1894*. Silver Spring, MD: Thomas Jefferson.
- **Khare, B. P., Gupta, S. B. & Chandra, S.** (1974). Biological efficacy of some plant materials against *Sitophilus oryzae* Linnaeus. *Indian journal of agricultural research*.
- **Kim, E. S. & Mahlberg, P. G.** (1997). Immunochemical localization of tetrahydrocannabinol (THC) in cryofixed glandular trichomes of *Cannabis* (Cannabaceae). *American Journal of Botany*, 84(3), 336–342.
- **Krapovickas, J. & Longhi, F.,** (2012). Pobreza, medio ambiente y pequeña producción en la ruralia del gran chaco argentino a comienzos de siglo XXI. V Congreso de la Asociación Latinoamericana de Población, Montevideo, Uruguay.
- **Latta, R. P. & Eaton, B. J.** (1975). Seasonal fluctuations in cannabinoid content of Kansas marijuana. *Economic Botany*, 29(2), 153-163.
- **Ledbetter, M. C. & Krikorian, A. D.** (1975). Trichomes of *Cannabis sativa* as viewed with scanning electron microscope. *Phytomorphology*, 25(1-2), 166.
- **Levin, D. A.** (1976). The chemical defenses of plants to pathogens and herbivores. *Annual review of Ecology and Systematics*, 7(1), 121-159.
- **Ley Nº 1.340.** Gaceta Oficial de la República del Paraguay, Asunción, Paraguay, 22 de noviembre de 1988.
- **Ley Nº 19.172.** Diario Oficial de la República Oriental del Uruguay, Montevideo, Uruguay, 10 de diciembre de 2013.
- **Ley Nº 20.000.** Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 2 de febrero de 2005.
- **Ley Nº 27.350.** Boletín Oficial de la República Argentina, Buenos Aires, Argentina, 29 de marzo de 2017.
- **Lindsey, A. & Newman, J. F.** (1956). Use of official weather data in spring time-temperature analysis of an Indiana phenological record. *Ecology* 37 (4), 812-823.

- **Lisson, S. N. & Mendham, N. J.** (1998). Response of fiber hemp (*Cannabis sativa* L.) to varying irrigation regimes. *Journal of the International Hemp Association* 5(1): 9-15.
- **Lisson, S. N. & Mendham, N. J.** (2000). Cultivar, sowing date and plant density studies of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.) in Tasmania. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 40, 975–986
- **Lisson, S. N., Mendham, N. J. & Carberry, P. S.** (2000a). Development of a hemp (*Cannabis sativa* L.) simulation model 1. General introduction and the effect of temperature on the pre-emergent development of hemp. *Aust. J. Exp. Agric.* 40:405-411.
- **López, M. Á., Chaves, B., Flórez, V. J. & Salazar, M. R.** (2010). Modelo de aparición de nudos en clavel (*Dianthus caryophyllus* L.) cv. Delphi cultivado en sustratos. *Agronomía Colombiana*, 28(1), 47-54.
- **Lydon, J.** (1986). J. Effects of ultraviolet-B radiation on the growth, physiology and cannabinoid production of *Cannabis sativa* L. Ph.D. thesis, Univ. of Maryland, College Park, MD, USA. p. 117.
- **Lydon, J., Teramura, A. H. & Coffman, C. B.** (1987). UV-B radiation effects on photosynthesis, growth and cannabinoid production of two *Cannabis sativa* chemotypes. *Photochemistry and Photobiology*, 46(2), 201-206.
- **Mahlberg, P. & Hemphill, J.** (1983). Effect of light quality on cannabinoid content of *Cannabis sativa* L. (Cannabaceae). *Botanical Gazette*, Vol. 144, No. 1, pp. 43-48.
- **Mandolino, G., Bagatta, M., Carboni, A., Ranalli, P. & de Meijer, E.** (2003). Qualitative and quantitative aspects of the inheritance of chemical phenotype in *Cannabis*. *Journal of Industrial Hemp*, 8(2), 51-72.
- **McKey, D.** (1979). The distribution of secondary compounds within plants. Herbivores-their interaction with secondary plant metabolites, 55-134.
- **Mehmedic, Z., Chandra, S., Slade, D., Denham, H., Foster, S., Patel, A. S., ... & ElSohly, M. A.** (2010). Potency Trends of  $\Delta^9$ -THC and Other Cannabinoids in Confiscated *Cannabis* Preparations from 1993 to 2008\*. *Journal of Forensic Sciences*, 55: 1209-1217.
- **Meijer, W. D., Van der Werf, H. M. G., Mathijssen, E. W. J. M. & Van den Brink, P. W. M.** (1995). Constraints to dry matter production in fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). *European Journal of Agronomy*, 4(1), 109-117.

- **Mendoza López, M. R., Aguilar, L. & Castillo, A. (2004).** Guayaba (*Psidium guajava* L.) su cultivo en el oriente de Michoacán. SAGARPA. INIFAP. Campo experimental Uruapan. México, DF, 4, 49.
- **Merfield, C. N. (1999).** Industrial hemp and its potential for New Zealand.
- **Meyer, A. D. & Seitz. E. O. (1942).** Ultraviolette Strahlen ihre Erzeugung, Messung, und Anwendung in Medizin, Biologie, und Technik. DeGruyter, Berlin.
- **Miller, N. G. (1970).** The genera of the Cannabaceae in the southeastern United States. *Journal of the Arnold Arboretum*, 51(2), 185-203.
- **Murari, G., Puccini, A. M., Sanctis, R. D. & Lombardi, S. (1983).** Influence of environmental conditions on tetrahydrocannabinol (Delta ('9) TCH) in different cultivars on *Cannabis sativa* L. *Fitoterapia* (Italy).
- **Murphy, G. M. & Hurtado, R. H. (2013).** *Agrometeorología* (No. 630.2515). Editorial Facultad de Agronomía, FAUBA.
- **Murphy, G. M. (en preparación).** Atlas agroclimático digital de la Argentina. Buenos Aires, Argentina. Editorial Facultad de Agronomía.
- **ONU (1961).** Convención Única sobre Estupefacientes. Naciones Unidas, Nueva York 1961, Artículo 49. Vol 13.
- **Pacifico, D., Miselli, F., Carboni, A., Moschella, A. & Mandolino, G. (2008).** Time course of cannabinoid accumulation and chemotype development during the growth of *Cannabis sativa* L. *Euphytica*, 160(2), 231-240.
- **Pahkala, K., Pahkala, E. & Syrjälä, H. (2008).** Northern limits to fiber hemp production in Europe. *Journal of Industrial Hemp*, 13(2), 104-116.
- **Pamplona, F. A., da Silva, L. R. & Coan, A. C. (2018).** Potential clinical benefits of CBD-rich *Cannabis* extracts over purified CBD in treatment-resistant epilepsy: observational data meta-analysis. *Frontiers in neurology*, 9, 759.
- **Paris, M., Boucher, F. & Cosson, L. (1975).** The constituents of *Cannabis sativa* pollen. *Economic Botany*, 29(3), 245-253.
- **Pascale, A. J. & Damario, E. (2004).** *Bioclimatología Agrícola y Agroclimatología*. EFA. Buenos Aires. Argentina.
- **Pate, D. (1983).** Possible role of ultraviolet radiation in evolution of *Cannabis* chemotypes. *Economic Botany*, 37, 396.

- **Pejić, B., Maksimović, L., Škorić, D., Milić, S., Stričević, R. & Ćupina, B.** (2009). Effect of water stress on yield and evapotranspiration of sunflower. *Helia*, 32(51), 19-32.
- **Potter, D. J. & Duncombe, P.** (2012). The Effect of Electrical Lighting Power and Irradiance on Indoor-Grown *Cannabis* Potency and Yield. *Journal of Forensic Sciences*, 57(3), 618-622.
- **Prohaska, F. J.** (1959). El polo de calor de América del Sur. *INTA, IDIA*, 141, 27-30.
- **Radošević, A., Kupinić, M. & Grlić, L. J.** (1962). Antibiotic activity of various types of *Cannabis* resin. *Nature*, 195(4845), 1007.
- **Ranalli, P.** (2004). Current status and future scenarios of hemp breeding. *Euphytica* 140, 121-131.
- **Rhodes, M. J. C.** (1985). physiological significance of plant phenolic compounds. *Biochemistry of plant phenolics*.
- **Robinson, B. B.** (1943). Hemp. Farmers' Bulletin No. 1935, U.S. Department of Agriculture. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office.
- **Rothschild, M. & Fairbairn, J. W.** (1980). Ovipositing butterfly (*Pieris brassicae* L.) distinguishes between aqueous extracts of two strains of *Cannabis sativa* L. and THC and CBD. *Nature*, 286(5768), 56.
- **Ruiz-Corral, J. A. R., López, H. E. F., Díaz, J. L. R. & Eguiarte, D. R. G.** (2002). Temperaturas cardinales y duración del ciclo de madurez del híbrido de maíz H-311 en condiciones de temporal. *Agrociencia*, 36(5), 569-577.
- **Russo, E. B.** (2007). History of *Cannabis* and its preparations in saga, science, and sobriquet. *Chemistry & biodiversity*, 4(8), 1614-1648.
- **Salazar, M. R.** (2006). Un modelo simple de producción potencial de uchuva (*Physalis peruviana* L.). (Tesis de Doctorado en Ciencias Agropecuarias – Área Agraria). Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. p.110.
- **Salazar-Gutierrez, M. R., Johnson, J., Chaves-Cordoba, B. & Hoogenboom, G.** (2013). Relationship of base temperature to development of winter wheat. *Int J Plant Prod*, 7(4), 741-762.
- **Sankari, H. S. & Mela, T. J. N.** (1998). Plant Development and Stem Yield of Non-domestic Fibre Hemp (*Cannabis sativa* L.) Cultivars in Long-day Growth Conditions in Finland. *Journal of agronomy and crop science*, 181(3), 153-159.

- **Sauli, J. O.** (1946). Nuestros principales productos agrícolas. Finlandia. Eripainos Pellervon vihoista 2–11.
- **Schaffner J. H.** (1926). The change of opposite to alternate phyllotaxis and repeated rejuvenations in hemp by means of changed photoperiodicity. *Ecology* 7: 315-325.
- **Schultes, R. E.** (1969). Hallucinogens of plant origin. *Science*, 163(3864), 245-254.
- **Schultes, R. E.** (1970). Random thoughts and queries on the botany of *Cannabis* (pp. 11-33). J. & A. Churchill.
- **Schultes, R. E. & Hofmann, A.** (1973). *The Botany and Chemistry of Hallucinogens*. Chas. Thomas, Springfield, IL.
- **Senchenko, G. I. & Timonin, M. A.** (1978). Hemp [in Russian]. Moscow: Kolos. 285 pp.
- **Sengloung, T., Kaveeta, L. & Nanakorn, W.** (2009). Effect of sowing date on growth and development of Thai hemp (*Cannabis sativa* L.). *Kasetsart J.(Nat. Sci.)*, 43, 423-431.
- **Sharma, G. K.** (1975). Altitudinal variaton in leaf epidermal patterns of *Cannabissativa*. *Bulletin of the torrey botanical club*.
- **Siler, J. F., Sheep, W. L., Bates, L. B., Clark, G. F., Cook, G. W. & Smith, W. H.** (1933). Marihuana smoking in Panama. *Mil Surg*, 73, 269-280.
- **Sikora, V., Berenji, J. & Latković, D.** (2011). Influence of agroclimatic conditions on content of main cannabinoids in industrial hemp (*Cannabis sativa* L.). *Genetika*, 43(3), 449-456.
- **Skoglund, G., Nockert, M. & Holst, B.** (2013). Viking and early Middle Ages northern Scandinavian textiles proven to be made with hemp. *Scientific reports*, 3, 2686.
- **Slafer, G. A. & Savin, R.** (1991). Developmental base temperature in different phenological phases of wheat (*Triticum aestivum*). *Journal of Experimental Botany*, 42(8), 1077-1082.
- **Small, E., Beckstead, H. D. & Chan, A.** (1975). The evolution of cannabinoid phenotypes in *Cannabis*. *Economic Botany*, 29(3), 219-232.
- **Small, E. & Marcus, D.** (2000). Hemp germplasm trials in Canada. In 3rd International Symposium Bioresource Hemp. Websites: Nova Corporation (Germany), Hemphasis Limited (Toronto).
- **Small, E.** (2015). Evolution and classification of *Cannabis sativa* (marijuana, hemp) in relation to human utilization. *The Botanical Review* 81, 189-294.
- **Soriano, F.** (2017). Marihuana. Planeta Argentina.

- **Stambouli, H., El Bouri, A., Bellimam, M. A., Bouayoun, T. & El Karni, N. (2007).** Cultivation of *Cannabis sativa* L. in northern Morocco. *Bulletin on Narcotics*, 57(1), 79-118.
- **Struik, P. C., Amaducci, S., Bullard, M. J., Stutterheim, N. C., Ventura, G. & Cromack, H. T. H. (2000).** Agronomy of fiber hemp (*Cannabis sativa* L.) in Europe. *Industrial Crops and Products* 11, 107-118.
- **Swain, T. (1977).** Secondary compounds as protective agents. *Annual review of plant physiology*, 28(1), 479-501.
- **Taboada, M. A., Damiano, F. & Lavado, R. S. (2009).** Inundaciones en la región pampeana. Consecuencias sobre los suelos. Alteraciones de la fertilidad de los suelos: el halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones, 103-127.
- **Tang, K., Struik, P. C., Yin, X., Thouminot, C., Bjelková, M., Stramkale, V. & Amaducci, S. (2016).** Comparing hemp (*Cannabis sativa* L.) cultivars for dual-purpose production under contrasting environments. *Industrial Crops and Products*, 87, 33-44.
- **Tamm, E. (1933).** Weitere Untersuchungen iiber die Keimung und das Auflaufen landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. [Further investigations on the germination and the emergence of agricultural crop plants.] *Pflanzenbau* 10:297-313.
- **Touw, M. (1981).** The religious and medicinal uses of Cannabis in China, India and Tibet. *Journal of psychoactive drugs*, 13(1), 23-34.
- **Trudgill, D. L., Honek, A. D. L. I., Li, D. & Van Straalen, N. M. (2005).** Thermal time-concepts and utility. *Annals of Applied Biology*, 146(1), 1-14.
- **Van der Werf, H. M. G., Haasken, H. J. & Wijlhuizen, M. (1994).** The effect of daylength on yield and quality of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). *European Journal of Agronomy*, 3(2), 117-123.
- **Van der Werf, H. M. G., Brouwer, K., Wijlhuizen, M. & Withagen, J.C.M. (1995a).** The effect of temperature on leaf appearance and canopy establishment in fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). *Annals of Applied Biology* 126: 551-561.
- **Van der Werf, H. M. G., Wijlhuizen, M. & De Schutter, J. A. A. (1995b).** Plant density and self-thinning affect yield and quality of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). *Field Crops Res.* 40, 153–164.

- **Van der Werf, H. M. G., Mathijssen, E. W. J. M. & Haverkort, A.J.** (1999). Crop physiology of *Cannabis sativa* L.: a simulation study of potential yield of hemp in northwest Europe. En: Ranalli, P. (ed.). *Advances in Hemp Research*. New York: Food Products Press, pp.85-108.
- **Vanhove, W., Van Damme, P. & Meert, N.** (2011). Factors determining yield and quality of illicit indoor *Cannabis* (*Cannabis* spp.) production. *Forensic Science International*, 212(1-3), 158-163.
- **Van Klinger, B. & Ten Ham, M.** (1976). Antibacterial activity of  $\Delta$  9-tetrahydrocannabinol and cannabidiol. *Antonie van Leeuwenhoek*, 42(1-2), 9-12.
- **Vavilov, N.** (1931). The role of Central Asia in the origin of cultivated plants. *Bulletin of Applied Botany, Genetics, and Plant Breeding* 26 (3): 3–44.
- **Whittaker, R. H. & Feeny, P. P.** (1971). Allelochemicals: chemical interactions between species. *Science*, 171(3973), 757-770.
- **Williams, D. H., Stone, M. J., Hauck, P. R. & Rahman, S. K.** (1989). Why are secondary metabolites (natural products) biosynthesized?. *Journal of Natural Products*, 52(6), 1189-1208.
- **Wright, A. H.** (1941). A report on the hemp fiber situation in Wisconsin and the United States. University of Wisconsin, College of Agriculture, radio script, July 15.
- **Zhang, W. J. & Björn, L. O.** (2009). The effect of ultraviolet radiation on the accumulation of medicinal compounds in plants. *Fitoterapia*, 80(4), 207-218.

## ANEXO I

- Análisis de los 106 sitios (n=1272).
  - Temperatura Media

### Prueba F para varianzas de dos muestras

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	17,0248978	16,92138365
Varianza	99,66906891	102,1251128
Observaciones	1272	1272
Grados de libertad	1271	1271
F	0,975950637	
P(F<=f) una cola	0,332201835	
Valor crítico para F (una cola)	0,911822789	

F es mayor al valor crítico por lo que son varianzas desiguales

### Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	17,0248978	16,92138365
Varianza	99,66906891	102,1251128
Observaciones	1272	1272
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	2542	
Estadístico t	0,259889635	
P(T<=t) una cola	0,397484977	
Valor crítico de t (una cola)	1,645453284	
P(T<=t) dos colas	0,794969953	
Valor crítico de t (dos colas)	1,960897652	

El estadístico T es menor al P de dos colas, por lo que las medias son iguales

- Precipitaciones

### Prueba F para varianzas de dos muestras

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	84,4765723	83,8639937
Varianza	8745,97133	7898,39612
Observaciones	1272	1272
Grados de libertad	1271	1271
F	1,10730979	
P(F<=f) una cola	0,03466456	
Valor crítico para F (una cola)	1,09670433	

F es mayor al valor crítico por lo que son varianzas desiguales

### Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	84,4765723	83,8639937
Varianza	8745,97133	7898,39612
Observaciones	1272	1272
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	2535	
Estadístico t	0,16934475	
P(T<=t) una cola	0,43276949	
Valor crítico de t (una cola)	1,64545494	
P(T<=t) dos colas	0,86553899	
Valor crítico de t (dos colas)	1,96090023	

El estadístico T es menor al P de dos colas, por lo que las medias son iguales

- Análisis de los 26 sitios ubicados entre los 0 y 100 metros sobre el nivel del mar (n=312).
  - Temperatura Media

**Prueba F para varianzas de dos muestras**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	22,20208333	22,12051282
Varianza	47,68397475	48,4182917
Observaciones	312	312
Grados de libertad	311	311
F	0,984833894	
P(F<=f) una cola	0,446446634	
Valor crítico para F (una cola)	0,829586679	

F es mayor al valor crítico por lo que son varianzas desiguales

**Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	22,20208333	22,12051282
Varianza	47,68397475	48,4182917
Observaciones	312	312
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	622	
Estadístico t	0,14697507	
P(T<=t) una cola	0,441599662	
Valor crítico de t (una cola)	1,647307092	
P(T<=t) dos colas	0,883199323	
Valor crítico de t (dos colas)	1,963785232	

El estadístico T es menor al P de dos colas, por lo que las medias son iguales

- Precipitaciones

**Prueba F para varianzas de dos muestras**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	110,380769	111,022436
Varianza	11956,3678	10836,9095
Observaciones	312	312
Grados de libertad	311	311
F	1,10330052	
P(F<=f) una cola	0,19325789	
Valor crítico para F (una cola)	1,20541955	

F es menor al valor crítico por lo que son varianzas iguales

**Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	110,380769	111,022436
Varianza	11956,3678	10836,9095
Observaciones	312	312
Varianza agrupada	11396,6386	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	622	
Estadístico t	-0,07507293	
P(T<=t) una cola	0,47009041	
Valor crítico de t (una cola)	1,64730709	
P(T<=t) dos colas	0,94018082	
Valor crítico de t (dos colas)	1,96378523	

El estadístico T es menor al P de dos colas, por lo que las medias son iguales

- Análisis de los 60 sitios ubicados entre los 100 y 1000 metros sobre el nivel del mar (n=720).
  - Temperatura Media

**Prueba F para varianzas de dos muestras**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	14,99495833	14,84930556
Varianza	126,5329928	129,1849787
Observaciones	720	720
Grados de libertad	719	719
F	0,979471407	
P(F<=f) una cola	0,390508567	
Valor crítico para F (una cola)	0,884470122	

F es mayor al valor crítico por lo que son varianzas desiguales

**Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	14,99495833	14,84930556
Varianza	126,5329928	129,1849787
Observaciones	720	720
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	1438	
Estadístico t	0,244401797	
P(T<=t) una cola	0,403477259	
Valor crítico de t (una cola)	1,645913959	
P(T<=t) dos colas	0,806954517	
Valor crítico de t (dos colas)	1,961615052	

El estadístico T es menor al P de dos colas, por lo que las medias son iguales

- Precipitaciones

**Prueba F para varianzas de dos muestras**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	76,3856944	74,3902778
Varianza	7657,44699	6676,08808
Observaciones	720	720
Grados de libertad	719	719
F	1,1469961	
P(F<=f) una cola	0,03307722	
Valor crítico para F (una cola)	1,13062044	

F es mayor al valor crítico por lo que son varianzas desiguales

**Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	76,3856944	74,3902778
Varianza	7657,44699	6676,08808
Observaciones	720	720
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	1431	
Estadístico t	0,44722203	
P(T<=t) una cola	0,32739122	
Valor crítico de t (una cola)	1,64591915	
P(T<=t) dos colas	0,65478244	
Valor crítico de t (dos colas)	1,96162314	

El estadístico T es menor al P de dos colas, por lo que las medias son iguales

- Análisis de los 20 sitios ubicados a una altura mayor a 1000 metros sobre el nivel del mar (n=240).
  - Temperatura Media

**Prueba F para varianzas de dos muestras**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	16,384375	16,37875
Varianza	39,51673183	42,94260094
Observaciones	240	240
Grados de libertad	239	239
F	0,920222133	
P(F<=f) una cola	0,260471048	
Valor crítico para F (una cola)	0,80798047	

F es mayor al valor crítico por lo que son varianzas desiguales

**Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	16,384375	16,37875
Varianza	39,51673183	42,94260094
Observaciones	240	240
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	477	
Estadístico t	0,009596398	
P(T<=t) una cola	0,496173656	
Valor crítico de t (una cola)	1,648054362	
P(T<=t) dos colas	0,992347312	
Valor crítico de t (dos colas)	1,964949728	

El estadístico T es menor al P de dos colas, por lo que las medias son iguales

- Precipitaciones

**Prueba F para varianzas de dos muestras**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	75,07375	76,9791667
Varianza	6754,31902	6537,04141
Observaciones	240	240
Grados de libertad	239	239
F	1,03323791	
P(F<=f) una cola	0,40033678	
Valor crítico para F (una cola)	1,23765368	

F es menor al valor crítico por lo que son varianzas iguales

**Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	75,07375	76,9791667
Varianza	6754,31902	6537,04141
Observaciones	240	240
Varianza agrupada	6645,68021	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	478	
Estadístico t	-0,25604179	
P(T<=t) una cola	0,39901436	
Valor crítico de t (una cola)	1,64804765	
P(T<=t) dos colas	0,79802872	
Valor crítico de t (dos colas)	1,96493927	

El estadístico T es menor al P de dos colas, por lo que las medias son iguales

- Análisis de los 73 países del hemisferio norte (n=876)
  - Temperatura Media

**Prueba F para varianzas de dos muestras**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	15,03974886	14,83527397
Varianza	123,0824726	125,4401829
Observaciones	876	876
Grados de libertad	875	875
F	0,981204505	
P(F<=f) una cola	0,389526821	
Valor crítico para F (una cola)	0,894694591	

F es mayor al valor crítico por lo que son varianzas desiguales

**Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	15,03974886	14,83527397
Varianza	123,0824726	125,4401829
Observaciones	876	876
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	1750	
Estadístico t	0,383891976	
P(T<=t) una cola	0,350552575	
Valor crítico de t (una cola)	1,645724816	
P(T<=t) dos colas	0,70110515	
Valor crítico de t (dos colas)	1,96132049	

El estadístico T es menor al P de dos colas, por lo que las medias son iguales

- Precipitaciones

**Prueba F para varianzas de dos muestras**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	83,1303653	82,31621
Varianza	10003,5516	8950,82447
Observaciones	876	876
Grados de libertad	875	875
F	1,11761231	
P(F<=f) una cola	0,05011945	
Valor crítico para F (una cola)	1,11769984	

F es menor al valor crítico por lo que son varianzas iguales

**Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	83,1303653	82,31621
Varianza	10003,5516	8950,82447
Observaciones	876	876
Varianza agrupada	9477,18802	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	1750	
Estadístico t	0,17502679	
P(T<=t) una cola	0,43053941	
Valor crítico de t (una cola)	1,64572482	
P(T<=t) dos colas	0,86107883	
Valor crítico de t (dos colas)	1,96132049	

El estadístico T es menor al P de dos colas, por lo que las medias son iguales

- Análisis de los 33 países del hemisferio sur (n=396)
  - Temperatura Media

**Prueba F para varianzas de dos muestras**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	21,41628788	21,53611111
Varianza	19,98349986	19,73552813
Observaciones	396	396
Grados de libertad	395	395
F	1,012564737	
P(F<=f) una cola	0,450656532	
Valor crítico para F (una cola)	1,180245591	

F es menor al valor crítico por lo que son varianzas iguales

**Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	21,41628788	21,53611111
Varianza	19,98349986	19,73552813
Observaciones	396	396
Varianza agrupada	19,85951399	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	790	
Estadístico t	-0,37834615	
P(T<=t) una cola	0,352637556	
Valor crítico de t (una cola)	1,646784726	
P(T<=t) dos colas	0,705275111	
Valor crítico de t (dos colas)	1,962971387	

El estadístico T es menor al P de dos colas, por lo que las medias son iguales

- Precipitaciones

**Prueba F para varianzas de dos muestras**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	87,4545455	87,2878788
Varianza	5969,42411	5569,99793
Observaciones	396	396
Grados de libertad	395	395
F	1,07171029	
P(F<=f) una cola	0,24581722	
Valor crítico para F (una cola)	1,18024559	

F es menor al valor crítico por lo que son varianzas iguales

**Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	87,4545455	87,2878788
Varianza	5969,42411	5569,99793
Observaciones	396	396
Varianza agrupada	5769,71102	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	790	
Estadístico t	0,03087481	
P(T<=t) una cola	0,48768859	
Valor crítico de t (una cola)	1,64678473	
P(T<=t) dos colas	0,97537718	
Valor crítico de t (dos colas)	1,96297139	

El estadístico T es menor al P de dos colas, por lo que las medias son iguales

- Análisis del trimestre cálido en los 106 sitios (n=318)
  - Temperatura Media

**Prueba F para varianzas de dos muestras**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	22,92100629	22,78490566
Varianza	20,28637438	19,81409321
Observaciones	318	318
Grados de libertad	317	317
F	1,023835619	
P(F<=f) una cola	0,417015908	
Valor crítico para F (una cola)	1,203273537	

F es menor al valor crítico por lo que son varianzas iguales

**Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	22,92100629	22,78490566
Varianza	20,28637438	19,81409321
Observaciones	318	318
Varianza agrupada	20,05023379	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	634	
Estadístico t	0,383264835	
P(T<=t) una cola	0,350825942	
Valor crítico de t (una cola)	1,647260585	
P(T<=t) dos colas	0,701651885	
Valor crítico de t (dos colas)	1,963712769	

El estadístico T es menor al P de dos colas, por lo que las medias son iguales

- Precipitaciones

**Prueba F para varianzas de dos muestras**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	132,242138	132,210692
Varianza	15158,0884	14105,9018
Observaciones	318	318
Grados de libertad	317	317
F	1,07459194	
P(F<=f) una cola	0,26113093	
Valor crítico para F (una cola)	1,20327354	

F es menor al valor crítico por lo que son varianzas iguales

**Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales**

	<i>Registrada</i>	<i>Modelada</i>
Media	132,242138	132,210692
Varianza	15158,0884	14105,9018
Observaciones	318	318
Varianza agrupada	14631,9951	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	634	
Estadístico t	0,00327808	
P(T<=t) una cola	0,49869275	
Valor crítico de t (una cola)	1,64726059	
P(T<=t) dos colas	0,99738551	
Valor crítico de t (dos colas)	1,96371277	

El estadístico T es menor al P de dos colas, por lo que las medias son iguales

## ANEXO II

El clima del área donde está ubicada la University of Mississippi Marijuana Research Facility fue representada con la información climática proveniente de la estación meteorológica emplazada en la localidad de Tupelo<sup>5</sup>, Mississippi, a 77 km en línea recta de dicha institución. Dicha estación es la más cercana a la universidad con la que se ha podido recabar información de un período de 54 años.

A continuación, se enumerarán las sentencias propuestas en el presente trabajo para realizar la zonificación de aptitud (“A”) y a continuación los datos climáticos de la localidad de Tupelo (“B”).

### LATITUD:

A: Sitios ubicados entre los 22 y 55º de Latitud.

B: 34º 15' LN

### TEMPERATURA:

A: Rango de temperaturas de aptitud

B: Como muestra el gráfico 10, las temperaturas medias máximas, medias y mínimas mensuales tenidas en consideración están dentro de los rangos establecidos.

A: Período sin heladas igual o mayor a cuatro meses.

B: La localidad de Tupelo tiene 5 meses consecutivos sin temperaturas mínimas absolutas menores a 0 °C.

A: Probabilidad de ocurrencia de temperaturas mayores a 40 °C y temperaturas máximas anuales medias superiores a 40 °C.

B: Estos datos no se encontraron en las estadísticas climáticas de Tupelo, por otro lado, figuran las temperaturas máximas absolutas y durante cuatro meses consecutivos del semestre cálido se encuentran temperaturas superiores a 40 °C (la máxima de 42,7 °C). Al ser temperaturas absolutas de una serie histórica de 54 años y

---

<sup>5</sup> Información disponible en <http://www.globalbioclimatics.org/pdf/us-tupel.pdf>

no contar con datos de probabilidad de ocurrencia, se espera que no sea un fenómeno muy habitual.

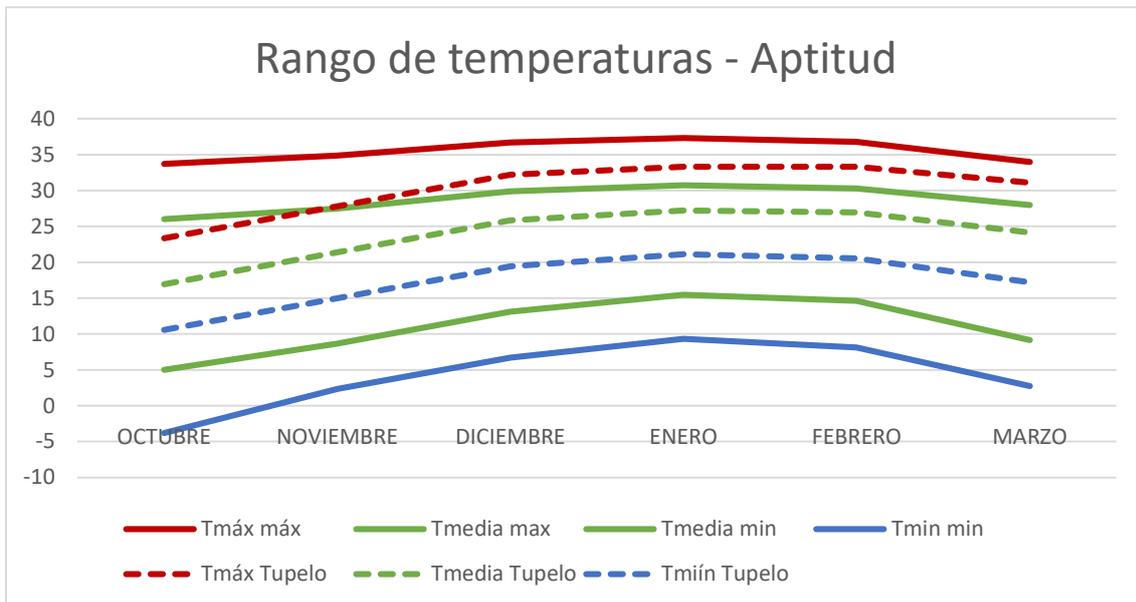


Gráfico 10 – Rango de temperaturas de aptitud y las propias de la localidad de Tupelo, Mississippi, EE.UU.

### PRECIPITACIONES:

A: Sitios con un ISH% mayor al 50%.

B: El semestre cálido de la localidad de Tupelo cuenta con un ISH% promedio del 69 % (Tabla 4).

A: Distribución de la ISH% que cumpla: %ETm cubierto en Octubre  $\geq$  %ETm cubierto en Noviembre  $\geq$  %ETm cubierto en Diciembre/Enero/Febrero/Marzo.

B: Como se observa en la Tabla 4 se cumple dicha sentencia.

A: Excesos hídricos durante febrero y marzo (hemisferio sur).

B: No hay excesos hídricos en los meses considerados.

**Tabla 4– Precipitaciones (PP), Evapotranspiración (ETP) e Índice de Satisfacción Hídrica (ISH%) mensual de la localidad de Tupelo.**

MES	PP	ETP	KC	ISH%
ENERO	129,3	9,37		
FEBRERO	123,4	12,15		
MARZO	160,8	32,04		
ABRIL	113,3	64,5	0,6	100%
MAYO	110,2	108,92	0,8	100%
JUNIO	98,6	154,09	1	64%
JULIO	103,4	172,34	1,2	50%
AGOSTO	82,6	161,36	1,2	43%
SEPTIEMBRE	80,5	117,05	1,2	57%
OCTUBRE	68,8	62,67		
NOVIEMBRE	104,4	23,67		
DICIEMBRE	134,9	10,62		

#### **FOTOPERÍODO:**

A: de 22 a 30 ° de latitud se definió como ambiente sub óptimo, entre los 30 a los 42 ° como ambiente óptimo y de los 42 a los 55 ° como ambiente no apto para variedades de cáñamo sensibles al fotoperíodo.

**B: Tupelo se encuentra a 34° 15' LN, es decir en un ambiente óptimo.**

A continuación, se enumerarán las sentencias propuestas en el presente trabajo para realizar la delimitación para la producción de cannabinoides (“A”) y a continuación los datos climáticos de la localidad de Tupelo (“B”).

#### **TEMPERATURA:**

A: Temperaturas medias entre 20 y 30 °C durante los últimos dos meses del cultivo.

**B: Las temperaturas medias de los últimos dos meses para el cultivo son de 27 y 24,2 °C.**

**PRECIPITACIONES:**

A: Sitios con valores de ISH% entre 50 a 70%

B: Tupelo presenta un promedio de 69% de ISH% para el semestre cálido.

**HUMEDAD:**

A: Sitios con valores de humedad relativa entre 45 a 65%.

B: No se encontraron valores de humedad relativa en la serie histórica revisada.