



*Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Escuela para Graduados*



**DIVERSIDAD MORFOLÓGICA Y ADAPTATIVA
DE POBLACIONES Y PROGENIES DE *Prosopis alba*
Grisebach DEL PARQUE CHAQUEÑO
ARGENTINO Y ESPINAL FRENTE AL CAMBIO
CLIMÁTICO**

Javier E. Frassoni

Tesis
Para optar al Grado Académico de
Doctor en Ciencias Agropecuarias

Córdoba, 2021

**DIVERSIDAD MORFOLÓGICA Y ADAPTATIVA DE
POBLACIONES Y PROGENIES DE *Prosopis alba* Grisebach
DEL PARQUE CHAQUEÑO ARGENTINO Y ESPINAL
FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO**

Javier E. Frassoni

Comisión Asesora de Tesis

Directora: Dra. Marisa Jacqueline Joseau

Codirector: Dr. Hernán Apezteguía

Asesora: Dra. Andrea Cosacov

Tribunal Examinador de Tesis

Dra. Andrea Cosacov

Dr. Diego Lopez Lauenstein

Dr. Antonio Dalmaso



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

RESUMEN

El algarrobo blanco (*P. alba*), especie nativa cultivada en Argentina como fuente de madera para aserrío, se distribuye en las llanuras áridas, semiáridas, subhúmedas y subtropicales de Argentina, Uruguay, Paraguay, sur de Bolivia y norte de Chile y Perú. En Argentina se encuentra en las regiones fitogeográficas del Chaco semiárido y subhúmedo, el Espinal y el Monte, sin embargo su distribución está siendo afectada por el cambio climático en una medida aún no mensurada. En este marco se planteó como objetivo de la tesis caracterizar la variación morfológica y adaptativa de poblaciones y progenies de *P. alba* del Parque Chaqueño argentino y Espinal frente al cambio climático. Se definió la distribución espacial actual de la especie en Argentina en base a bibliografía, la base de datos del Banco Nacional de germoplasma de *Prosopis* e Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Se identificó al Espinal como la zona menos muestreada y a través de análisis de imágenes satelitales se determinaron y confirmaron a campo 22 nuevas poblaciones. Se elaboró un SIG con la información obtenida hasta este punto. Se identificaron las variables climáticas de mayor incidencia en la distribución, se modeló el nicho climático y se definieron 5 zonas climáticas homogéneas de presencia de *P. alba*. Se caracterizó morfológica y edáficamente las poblaciones muestreadas. Se identificaron dos nuevos morfotipos para el Espinal. Las variables que caracterizaron fisicoquímicamente los suelos fueron CE, pH, MOS y textura. Se definieron las relaciones entre la caracterización edáfica y morfológica. Se determinó la variación adaptativa de la especie en ensayo de progenie y de estrés hídrico. En el ensayo de progenie, la variación adaptativa fue determinada identificando tres grupos de brotación, modelando la brotación de los grupos en el tiempo, e identificando dos grupos de velocidad media de crecimiento de los brotes; mientras que el ensayo factorial de estrés hídrico (temperatura- potencial osmótico y orígenes), diferenció a la población noroeste de Córdoba como el origen con mejor adaptación del ensayo basado en la variable número de semillas germinadas al día 21. Se definieron las distribuciones futuras de *P. alba*, basada en el modelo CCSM4 de cambio climático, y utilizando dos escenarios distintos, RCP 4.5 y RCP 6.0. Se concluye que existe diversidad morfológica y adaptativa de poblaciones y progenies de *Prosopis alba* del Parque Chaqueño argentino y Espinal frente al cambio climático.

Palabras claves: domesticación, diversidad, algarrobo blanco, variación adaptativa, morfotipos

ABSTRACT

The white “algarrobo” (*P. alba*), is a native species cultivated in Argentina as a source of wood for sawmills. It is distributed in the arid, semi-arid, sub-humid and subtropical plains of Argentina, Uruguay, Paraguay, southern Bolivia, northern Chile, and northern Peru. In Argentina it is located in the phytogeographic regions: semi-arid and subhumid Chaco, Espinal and Monte. However, climate change is affecting its distribution and the impact has not been dimensioned. Therefore, the objective of the thesis was to characterize the morphological and adaptive variation in the face of climate change, of populations and progenies of *P. alba* in the Argentine phytogeographic region of Chaco and Espinal. The current spatial distribution in Argentina was defined based on bibliography, a previous database constructed by the National Germplasm Bank of *Prosopis* and the National Institute of Agricultural Technology. Espinal was identified as the least sampled area, where 22 new populations were determined and confirmed in the field through satellite image analysis. With this information and several edaphoclimatic covariates a GIS was built. The climatic variables with the highest influence in the distribution were identified, the ecological niche was modeled and five homogeneous climatic zones with the presence of *P. alba* were determined. The sampled populations were characterized by leaf morphology and edaphic characteristics morphologically and edaphically. Two new morphotypes were identified for the Espinal. The variables that physically characterized the soils were EC, pH, SOM, and texture. The relationships between the edaphic and morphological characterization were studied. The adaptive variation of the species was studied in a progeny test and a hydric stress experiment. In the progeny test, adaptive variation was determined by identifying three groups of sprouting behavior. Sprouting was modeled over time, and two groups of sprouting speed growth were identified. In the factorial experiment of hydric stress (factors: temperature, osmotic potential, and origins), the northwestern population of Córdoba was the origin with the best adaptation due to the variable number of germinated seeds on day 21. Future distributions of *P. alba* were defined, based on the CCSM4 climate change model using two different scenarios, RCP 4.5, and RCP 6.0. It is concluded that there is morphological and adaptive diversity of populations and progenies of *Prosopis alba* from the Chaco and Espinal in the face of climate change.

Keywords: domestication, diversity, white “algarrobo”, adaptive variation, morphotypes

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	4
ABSTRACT	5
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE ABREVIATURAS	11
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN GENERAL	13
La especie	17
HIPÓTESIS	24
OBJETIVOS	25
OBJETIVO GENERAL	25
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
BIBLIOGRAFÍA	26
CAPÍTULO II	
CARACTERIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y CLIMÁTICA DE <i>P. alba</i> DE CRECIMIENTO ESPONTÁNEO	33
INTRODUCCIÓN	33
MATERIALES Y MÉTODOS	36
Recopilación de datos de presencia de <i>P. alba</i>	36
Detección de poblaciones de <i>P. alba</i> en la región fitogeográfica del Espinal	37
Muestreo a campo	37
Determinación de zonas climáticas homogéneas de presencia de <i>P. alba</i>	38
Ajuste del modelo de nicho actual de <i>P. alba</i>	39
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
Recopilación de datos de presencia de <i>P. alba</i>	42
Detección de poblaciones de <i>P. alba</i> en la región fitogeográfica del Espinal- Muestreo a Campo	42
Determinación de zonas climáticas homogéneas de presencia de <i>P. alba</i>	44
Ajuste del modelo de nicho actual de <i>P. alba</i>	50
CONCLUSIONES	56
BIBLIOGRAFÍA	58
CAPÍTULO III	
CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y EDÁFICA DE LAS POBLACIONES DE CRECIMIENTO ESPONTÁNEO DE <i>P. alba</i> EN LA REGIÓN FITOGEOGRÁFICA DEL ESPINAL	63
INTRODUCCIÓN	63
MATERIALES Y MÉTODOS	67
Muestreo de poblaciones espontáneas	67
Caracterización morfológica	68
Caracterización edáfica	70
Asociación entre la caracterización morfológica y la caracterización edáfica	73
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
Caracterización morfológica	73
Caracterización edáfica	80
Asociación entre la caracterización morfológica y la caracterización edáfica	83
CONCLUSIONES	88

BIBIOLGRAFÍA	89
CAPÍTULO IV	
ESTUDIO DE LA VARIACIÓN ADAPTATIVA DE <i>P. alba</i> MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN DE ESTRATEGIAS DE BROTAÇÃO EN ENSAYOS DE PROGENIE Y DE TOLERANCIA AL ESTRÉS HÍDRICO A NIVEL DE SEMILLA DE POBLACIONES DE ORÍGENES CONTRASTANTES	93
INTRODUCCIÓN	93
MATERIALES Y MÉTODOS	98
Análisis de la variación adaptativa según estrategias de brotación de poblaciones de <i>P. alba</i> en ensayo de progenie	98
Análisis de la variación adaptativa de poblaciones de <i>P. alba</i> en ensayo de estrés hídrico a nivel de semilla	103
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	107
Análisis de la variación adaptativa según estrategias de brotación de poblaciones de <i>P. alba</i> en ensayo de progenie	107
Análisis de la variación adaptativa de poblaciones de <i>P. alba</i> en ensayo de estrés hídrico a nivel de semilla	118
CONCLUSIONES	130
BIBLIOGRAFÍA	132
CAPÍTULO V	137
DEFINICIÓN DE POTENCIALES ÁREAS DE IMPACTO DEL CAMBIO CLIMATICO SOBRE LAS POBLACIONES DE <i>P. alba</i>	137
INTRODUCCIÓN	137
MATERIALES Y MÉTODOS	140
Distribución potencial de <i>P. alba</i> bajo dos escenarios climáticos futuros (IPCC)	140
Definición de las potenciales áreas de impacto del cambio climático sobre las poblaciones de <i>P. alba</i>	142
Impacto del cambio climático sobre la variación adaptativa de la especie	143
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	143
Distribución potencial de <i>P. alba</i> bajo dos escenarios climáticos futuros (IPCC)	143
Definición de las potenciales áreas de impacto del cambio climático sobre las poblaciones de <i>P. alba</i>	145
Impacto del cambio climático sobre la variación adaptativa de la especie	147
CONCLUSIONES	149
BIBLIOGRAFÍA	151
CAPÍTULO VI	
CONCLUSIONES GENERALES	155
CONSIDERACIONES FINALES	158
ANEXO 1	
CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LOS MORFOTIPOS DE <i>P. alba</i>	160
ANEXO 2	
CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO- QUÍMICAS DE LOS SUELOS MUESTREADOS	162

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Denominación, nomenclatura y unidad de medida de las variables bioclimáticas utilizadas para determinar las zonas climáticas homogéneas de presencia de <i>P. alba</i>	38
Tabla 2.2. Descripción de la cantidad y tipo de material colectado de <i>P. alba</i> por población en los muestreos realizados en las temporadas 2016 y 2017	43
Tabla 2.3. Coeficientes de correlación y p- valor entre variables climáticas	45
Tabla 2.4. Valores de AUC mayores a 0,850 obtenidos para los diferentes modelos	52
Tabla 3.1. Sitios y cantidad de muestras de suelo recolectadas	71
Tabla 3.2. Poblaciones participantes de cada grupo morfológico formado	75
Tabla 3.3. Caracteres morfológicos de los morfotipos de <i>P. alba</i> obtenidos para la región fitogeográfica del Espinal	76
Tabla 3.4. Medidas resúmenes de las principales propiedades físico- químicas de los suelos de presencia de <i>P. alba</i> en la región fitogeográfica del Espinal	81
Tabla 3.5. Medidas resúmenes por sitio de las principales propiedades físico- químicas de los suelos de presencia de <i>P. alba</i> en la región fitogeográfica del Espinal	80
Tabla 3.6. Relaciones significativas entre las variables edáficas y morfológicas	86
Tabla 4.1. Caracterización geográfica- climática de los 16 OGC seleccionados	99
Tabla 4.2. Diámetro a la altura de pecho (DAP) por clase diamétrica de los individuos seleccionados	102
Tabla 4.3. Orígenes de las semillas de <i>P. alba</i> utilizadas en el ensayo de estrés hídrico	106
Tabla 4.4. Índice de brotación de <i>P. alba</i> en Santiago del Estero (IB) por orígenes geográficos climáticos (OGC)	108
Tabla 4.5. Características geográfico- climáticas de los grupos de brotación	112
Tabla 4.6. Modelos de porcentaje de brotación en función del tiempo	112
Tabla 4.7. Velocidades medias de crecimiento de los brotes por orígenes geográficos climáticos	114
Tabla 4.8. Características geográfico- climáticas de los grupos de velocidad media de crecimiento de los brotes	115
Tabla 4.9. Semillas germinadas a los 20 días desde la siembra según potencial hídrico	120
Tabla 4.10. Semillas germinadas a los 21 días de los orígenes de <i>P. alba</i> ensayados	122
Tabla 4.11. Semillas germinadas a los 21 días según temperaturas de germinación y origen	122
Tabla 4.12. Semillas germinadas a los 21 días según temperatura y potencial osmótico	123
Tabla 4.13. Semillas germinadas a los 21 días según potencial osmótico y origen	124
Tabla 4.14. Longitud de la raíz principal por origen de plántulas normales a los 21 días	125
Tabla 4.15. Longitud de la raíz principal de plántulas normales a los 21 días por origen y temperatura	126
Tabla 4.16. Longitud de la raíz principal de plántulas normales de 21 días por potencial osmótico y origen	127
Tabla 4.17. Tasa de germinación de plántulas normales a los 21 días según temperatura y potencial osmótico	128
Tabla 4.18. Tasa de germinación de plántulas normales a los 21 días según origen y potencial osmótico	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa de interrelaciones de los contenidos trabajados en la tesis.	21
Figura 2.1. Etapas realizadas en el ajuste del modelo de nicho de <i>P. alba</i>	39
Figura 2.2. Ubicación geográfica de las 22 poblaciones muestreadas	43
Figura 2.3. SIG de presencia de <i>P. alba</i> asociada a variables bioclimáticas.	44
Figura 2.4. Dendrograma entre individuos representados por 16 variables climáticas con clasificación Jerarquizada.	45
Figura 2.5. Heterogeneidad dentro del grupo según número de conglomerado	46
Figura 2.6. Análisis de los grupos formados: a) ordenamiento bidimensional de variables ambientales en dos ejes principales, b) dispersión de datos según latitud y longitud.	47
Figura 2.7. Agrupamientos discriminante para 5 grupos conformados con las 17 variables: 16 climáticas y la altitud	48
Figura 2.8. a) Zonas climáticas homogéneas de distribución de <i>P. alba</i> en la Argentina b) puntos de presencia de la especie en relacionadas a las regiones fitogeográficas	49
Figura 2.9. Distribución de <i>P. alba</i> según los 1.172 puntos de presencia de la especie.	51
Figura 2.10. Modelo de nicho actual ajustado con <i>features linear</i> y <i>quadratic</i> .	52
Figura 2.11. Contribución de las variables climáticas a la variabilidad total del modelo de distribución generado.	54
Figura 2.12. Coeficientes individuales y globales en relación a las variables bioclimáticas usadas en el modelado de nicho de <i>P. alba</i> .	55
Figura 2.13. Proyección del modelo de distribución generado a una zona geográfica más amplia	56
Figura 3.1. Material colectado de <i>P. alba</i> . Detalle de: a) frutos, b) hojas	68
Figura 3.2. Variables medidas con el programa Hojas 3.4. para realizar la caracterización morfológica	69
Figura 3.3. Dendrograma obtenido con el método UPGMA de un análisis de conglomerado Jerarquizado realizado con las mediciones de 11 caracteres morfológicos de hojas de los 22 sitios muestreados	74
Figura 3.4. Ubicación geográfica de los grupos morfológicos por poblaciones	76
Figura 3.5. Árboles tipo representativos del a) grupo 1, árbol 8A y b) grupo 2, árbol 11E	77
Figura 3.6. Dendrograma obtenido con los 5 morfotipos identificados por Verga <i>et al.</i> (2009), Verga (2014) y Marcó <i>et al.</i> (2016) y a) los 22 sitios resultantes del muestreo, y b) las medias de los dos grupos morfológicos formados para el Espinal	78
Figura 3.7. Gráfico de estrellas realizado con las 11 variables morfológicas utilizadas para diferenciar los siete morfotipos	79
Figura 3.8. Clases texturales de los 16 sitios representados en un triángulo textural.	81
Figura 3.9. Caracterización colorimétrica de los suelos en seco de las localidades muestreadas según cartas Munsell.	82
Figura 3.10. Tendencias espaciales de las variables del horizonte 1: a) MO, b) CE, 3) pH y d) Porcentaje de Arcilla.	83
Figura 3.11. Ordenamiento bidimensional de 11 caracteres morfológicos de hojas y 6 variables edáficas de 16 sitios de presencia de <i>P. alba</i> de la Región fitogeográfica del Espinal.	84
Figura 3.12. <i>Partial Least Squares</i> entre las variables edáficas como variables predictoras, y a las variables morfológicas como variables respuesta	87
Figura 3.13. a) distribución de los grupos morfológicos definidos para la región del Espinal y b) distribución de la variable conductividad eléctrica de los suelos.	88

Figura 4.1. Distribución de los 16 orígenes geográficos y climáticos seleccionados.	99
Figura 4.2. Detalles de la metodología de obtención de los datos de brotación: a) Vista superior del árbol con ubicación de los brotes marcados y b) brote marcado en orientación norte.	103
Figura 4.3. Duración de la fase de brotación en días julianos por cada grupo de brotación formado.	108
Figura 4.4. Distribución geográfica de los grupos de brotación formados.	110
Figura 4.5. Ordenamiento bidimensional de los GB en función de las variables geográficas- climáticas.	111
Figura 4.6. Brotación en función del tiempo para los diferentes grupos de brotación	113
Figura 4.7. Distribución geográfica de los grupos formados para velocidad media de crecimiento de los brotes.	115
Figura. 4.8. Diagrama de dispersión de índice de brotación y velocidad media de crecimiento de los brotes en función de los orígenes geográficos climáticos.	117
Figura. 4.9. Distribución espacial de los cuatro grupos de estrategias de brotación.	117
Figura 4.10. Diagrama de dispersión de la longitud de la raíz principal de los ecotipos BNGP: 4000 y 4472 en las diferentes fechas de medición.	118
Figura 4.11. Evolución de la longitud de la raíz principal en función del tiempo según de los tratamientos del primer pre-ensayo.	119
Figura 4.12. Evolución de la germinación en función del tiempo según los tratamientos del primer pre-ensayo.	119
Figura 5.1. Modelos de proyección para el año 2070 de: a) RCP 4.5 y b) RCP 6.0.	144
Figura 5.2. Tendencia del desplazamiento de proyección a) RCP 4.5 y b) RCP 6.0.	146
Figura 5.3. Zonas de condición óptima para la germinación futura (20<=> 30 °C).	148
Figura 5.4. Zonas prioritarias para la conservación de <i>P. alba</i> .	149

LISTA DE ABREVIATURAS

ACP: análisis de componentes principales
ADL: análisis discriminante lineal
AFOL: ancho del foliólulo
ANAVA: análisis de la varianza
APTOT: relación entre la superficie del tercio superior del foliólulo respecto del área total del foliólulo
ARFOL: área foliar
ARTOT: área total
AUC: por sus siglas en inglés *area under the curve*
BE: Bermejo
BIO: variables bioclimáticas
BLUP's: por sus siglas en inglés: *best linear unbiased predictor*
BNGP: Banco Nacional de Germoplasma de *Prosopis*
CE: conductividad eléctrica
CIAP: Centro de Investigaciones Agropecuarias
CIMA: Centro de Investigaciones de Mar y Atmósfera
CMIP5: por sus siglas en inglés *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*
COT: carbono orgánico total
CP: componente principal
CS: Chaqueño Sur
DAP: diámetro a la altura de pecho
DI: diámetro intermedio
DIFOL: distancia foliar
DM: diámetro mayor
Dm: diámetro menor
EB: estrategias de brotación
ES: Espinal
FAO: por sus siglas en inglés *Food and Agriculture Organization*.
GB: grupos de brotación
GBI: grupo de brotación intermedia
GBTA: grupo de brotación tardía
GBTE: grupo de brotación temprana
GPS: por sus siglas en inglés *Global Positioning System*
GVMCBLe: grupo de velocidad media de crecimiento de los brotes lento
GVMCBRa: grupo de velocidad media de crecimiento de los brotes rápido
H: por sus siglas en inglés *hinge*
IB: índice de brotación
IFRGV: Instituto de Fisiología y Recursos Genéticos Vegetales
IM: índice de Moran
INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
IPCC: por sus siglas en inglés *Intergovernmental Panel on Climate Change*
ISTA: por sus siglas en inglés *International Seed Testing Association*

L_AFOL: relación longitud/ ancho del foliólulo
LECASUR: laboratorio de calidad de suelo
LFOL: largo del foliólulo
LPE: longitud del pecíolo
LPI: longitud de la pina
LQ: por sus siglas en inglés *linear y quadratic*
LQH por sus siglas en inglés *linear, quadratic, y hinge*
LQHP por sus siglas en inglés *linear, quadratic, hinge y product*
LR: longitud de la raíz principal
MANOVA: por sus siglas en inglés *multivariate analysis of variance*
MCGs: Modelos Climáticos Generales
MFT: morfotipos
MFTESP: morfotipo de la región fitogeográfica del Espinal
MOS: materia orgánica del suelo
NFOL: número de pares de foliólulos
NPI: número de pares de pinas
O: origen
OCG: orígenes geográficos climáticos
P: plántulas
PEG: polietilenglicol
PG: poder germinativo
PLS: por sus siglas en inglés *Partial Least Squares*
PN: plántulas normales
PNUMA: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
pp: precipitación
RAS: relación de absorción de Sodio
RCP: Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés)
RN: Ruta Nacional
RP: Ruta Provincial
SAGyP: Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca
SAyDS: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable
SG: Santiagueño
SGE: semillas germinadas
SIG: sistema de información geográfica
SN: Salta Norte
T: temperatura
TMA: temperatura media anual
TMC: temperatura máxima media del mes más caliente
TMF: temperatura mínima media del mes más frío
UCC: Universidad Católica de Córdoba
UNC: Universidad Nacional de Córdoba
UPGMA: por sus siglas en inglés *unweighted pair group method with arithmetic mean*
VIF: factor de inflación de la varianza
VMCB: velocidades medias de crecimiento de los brotes

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

Según la FAO y PNUMA (2020), la superficie forestal mundial abarca alrededor de 4.060 millones de hectáreas, que cubren el 30,8 % de la superficie global, porcentaje del cual aproximadamente la mitad se encuentra intacto y más de un tercio son bosques primarios, condición que se mantiene estable desde el informe publicado por FAO en el año 2009 (FAO, 2009). En este documento se describe la participación de los bosques por regiones, donde América Latina y el Caribe participan con el 22 % de los bosques del mundo, que corresponde a un área de 860 millones de hectáreas aproximadamente. De estas, 831,5 millones de hectáreas se encuentran en América del Sur (97%) (FAO, 2009). Los bosques albergan la mayor parte de la biodiversidad terrestre de nuestro planeta (*Millennium ecosystem assessment*, 2005), hay más de 60.000 especies de árboles registradas en la base de datos *Global Tree Search* (FAO y PNUMA, 2020), de las cuales más de 20.000 figuran en la lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y más de 8.000 se consideran amenazadas a nivel mundial (FAO y PNUMA, 2020). Los bosques participan en la conservación de la biodiversidad, proporcionando hábitats para el 80 % de las especies de anfibios, el 75 % de las especies de aves y el 68 % de las especies de mamíferos (Vié, Hilton-Taylor y Stuart, 2009). La diversidad biológica de los bosques es el resultado de procesos evolutivos de miles e incluso millones de años que, en sí mismos, están impulsados por fuerzas ecológicas como el clima, el fuego, la competencia y las perturbaciones. Además, la diversidad de los ecosistemas forestales (tanto por sus características físicas como biológicas) da como resultado altos niveles de adaptación (FAO y PNUMA, 2020). Sin embargo, los bosques también brindan otros beneficios, ya que participan en el mantenimiento de las reservas de carbono, proveen servicios imprescindibles para la vida humana, como son la regulación hídrica, la conservación de suelos, la provisión de espacios para recreación y turismo, además de ser el continente de valores sociales, culturales y espirituales asociados (Cordero, 2011).

Se estima que desde 1990, se han perdido unos 420 millones de hectáreas de bosques a causa del cambio de usos de la tierra (FAO y PNUMA, 2020). Los cambios

incluyen procesos de explotación maderera industrial insostenible, incendios, pero, sobre todo, cambios de uso de suelo debido a la expansión de la producción agropecuaria, proceso que supone la principal causa de deforestación, parcelación del bosque y pérdida de biodiversidad forestal (Potapov, 2017). Con respecto a la tasa de deforestación, la FAO y PNUMA (2020) sostienen que ha disminuido sustancialmente desde 1990 al 2000. Se estima que en la década de 1990 la tasa de deforestación fue de 16 millones de hectáreas al año, mientras que durante el período 2015-2020 fue de 10 millones de hectáreas al año (FAO y PNUMA, 2020). Con respecto a la producción agropecuaria, existe actualmente una demanda mundial creciente de productos agrícolas, ganaderos, forestales y de biocombustibles, cuya producción en la mayoría de los casos conlleva rápidos procesos de deforestación y cambio de uso del suelo. Este último cambio no solamente está asociado con la producción agropecuaria a gran escala, sino también con la apertura de vías de comunicación y la construcción de rutas y caminos necesarios para la comercialización y exportación de dicha producción (Cordero, 2011). Esta pérdida de bosque tiene graves consecuencias ambientales y económicas, en particular la pérdida de los medios de vida de comunidades y poblaciones que dependen de los recursos forestales, la escasez de agua, la destrucción de hábitats de especies en peligro y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Este último factor adquiere especial relevancia ya que contribuye al cambio climático (FAO y PNUMA, 2020), proceso cada vez más en estudio en interacción con la biodiversidad debido a que las fluctuaciones climáticas traen aparejadas cambios en la biodiversidad del planeta (Trejo, 1983).

El cambio climático es la mayor amenaza medioambiental a la que se enfrenta nuestro planeta, la temperatura sobre la tierra ha mantenido un patrón creciente alcanzando valores promedios de 1,53 °C más altos para el periodo 2006–2015 en relación al período 1850–1900 (IPCC, 2019). Estas temperaturas más cálidas (con patrones cambiantes de precipitación) han: alterado el inicio y el final de las temporadas de cultivo, contribuido a la reducción del rendimiento de los cultivos regionales, reducido la disponibilidad de agua dulce, sometido a la biodiversidad a un mayor estrés y han aumentado la mortalidad de los árboles (IPCC, 2019). En el futuro se esperan cambios en el clima que producirán sequías severas y prolongadas, aumento de las precipitaciones en algunas regiones y disminución en otras, aumentos de las temperaturas y en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, entre otros,

algunos de ellos ya están ocurriendo (SAyDS, 2015). Predicciones climatológicas del IPCC (2007), indican que hacia el 2107 la temperatura podría incrementarse entre 1,1 y 6,4°C. Argentina es una de las regiones del mundo que ha presentado mayores variaciones climáticas en el siglo XX. Durante el mismo se registró un significativo aumento de la temperatura de superficie en la Patagonia e islas del Atlántico sur, aunque las tendencias positivas de temperatura al norte de los 40° S, fueron menores y sólo perceptibles a partir de los últimos 40 años. Además, allí se registró un importante aumento de la precipitación durante las décadas del 60 y 70. En el núcleo productivo de la Pampa Húmeda, el incremento de las precipitaciones fue superior en un 30 % a los valores observados durante la década del 50. Como consecuencia, se produjo una expansión de la frontera agropecuaria hacia el oeste, incrementando la actividad agrícola alrededor de 100.000 km² (SAyDS, 2015). En este marco, los bosques tienen un rol fundamental en la adaptación al cambio climático (Cordero, 2011).

En términos generales, se ha documentado que el cambio climático afecta directa e indirectamente a individuos, poblaciones y especies, así como a los ecosistemas en su composición y función (Parmesan, 2006; IPCC, 2007; Backlund *et al.*, 2008). Estudios recientes concuerdan en que el calentamiento global puede generar tres posibles respuestas a escala de especies: desplazamiento, adaptación (ya sea en términos de cambios evolutivos o adaptaciones fisiológicas) o extinción local (Holt, 1990; Peterson *et al.*, 2001). La distribución de las especies puede verse afectada debido a que están asociadas a un rango térmico, de humedad y radiación, que influye en la fenología y fisiología (Vázquez, 2005), y estos rangos están asociados a ciertas ubicaciones geográficas en el planeta, es decir a su distribución geográfica (Hughes, 2000). Las especies se adaptan a variaciones espaciales y temporales utilizando distintas estrategias de adaptación (Lerner, 1954; Levins, 1968), como pueden ser la especialización en la que se altera la frecuencia génica y se produce una población diferente, o la plasticidad fenotípica utilizada por algunas especies para adaptarse a un amplio rango de ambientes. En cuanto a las extinciones es más probable la ocurrencia de esta respuesta para las especies que tienen una distribución restringida (como por ejemplo distribuciones endémicas) (Bravo Cadena, Sánchez Rojas y Gelviz-Gelvez, 2011).

Por otro lado, como es sabido, todas las especies forestales nativas de Argentina sufren, actualmente, las consecuencias de una intensa modificación antrópica de los

ambientes, pero con mayor intensidad, aquellas que brindan múltiples beneficios al hombre, denominadas comúnmente "especies de uso múltiple" (Verzino y Joseau, 2005). Tal vez una de las especies arbóreas de uso múltiple más representativas de la región, corresponde al género *Prosopis*. Este género perteneciente a la familia *Leguminosae*- subfamilia *Mimosoideae*, presenta en Argentina 11 especies endémicas de uso múltiple (Burkart, 1976; Hunziker *et al.*, 1986). Se destacan, desde el punto de vista productivo y ecológico, *P. alba* Griseb, *P. flexuosa* D.C., *P. chilensis* (Mol.) Stuntz y *P. caldenia* Burkart, las que, conjuntamente con *P. nigra* (Grisebach) Hieronymus, integran los últimos fragmentos de las formaciones boscosas (Verzino y Joseau, 2005). Estas especies multipropósitos son muy apreciadas por su madera, utilizada para la fabricación de revestimientos, pisos, aberturas, muebles, artesanías y, finalmente para la combustión en forma de leña y carbón. Sus flores son melíferas y sus frutos comestibles. Son ideales para planteos silvopastoriles, por la protección que brindan al ganado y al suelo, y por el forraje que proporcionan sus frutos y hojas. Fijan nitrógeno del aire en simbiosis con rizobacterias y mejoran el ciclo de nutrientes de los ecosistemas que integran debido a sus raíces profundas y aportes significativos de materia orgánica (Catalán *et al.*, 1997; Galera, 2000). Son especies pioneras de rápido crecimiento, producen semillas de buen poder germinativo que se mantiene por mucho tiempo (semillas conservadas a -18 °C mantienen su poder germinativo por períodos superiores a 25 años), por lo que se adaptan sin inconvenientes al cultivo, y sus recursos genéticos son de fácil conservación *ex-situ* (Verzino *et al.*, 2005a y 2019).

Entre las especies de mayor importancia económica y ecológica para el país, se destaca *P. alba* (algarrobo blanco), con mayor potencialidad para la producción de madera de calidad, abasteciendo actualmente una industria en expansión. Se encuentra principalmente en las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de las llanuras subtropicales de Argentina, Uruguay, Paraguay, sur de Bolivia y norte de Chile y Perú (Galera, 2000; Verzino *et al.*, 2005; Ledesma, De Bedia y López, 2008, 2008; Karlin *et al.*, 2013). En Argentina es muy abundante en la zona centro y norte del país, pertenecientes a las provincias fitogeográficas del Chaco semiárido y subhúmedo, Espinal y del Monte (Burkart, 1976; Roig, 1993; Ferreyra, 2000; Ledesma *et al.*, 2008; Iñes, 2020). *P. alba* es una de las especies nativa más cultivada en Argentina (9.000 ha) como fuente de madera para aserrío (Salto y Lupi, 2019), aunque en la actualidad más del 80 % de su madera proviene de los bosques nativos de la región chaqueña,

principalmente de las provincias de Chaco y Formosa (Navall *et al.*, 2015). Su creciente utilización para leña, forraje y alimentos hace que este recurso sea explotado sin tener en cuenta los principios básicos de un aprovechamiento racional y sostenido (de Galindez *et al.*, 2005). Su madera es valiosa por su excelente veteado y nobleza que permite el procesamiento sin necesidad de secado (Verzino, Joseau y Coirini, 2012); se la usa también para carpintería de obra, parquet y revestimientos (de Galindez *et al.*, 2005).

La especie

P. alba es conocida vulgarmente: “algarrobo blanco”, “algarrobo” “panta” (árbol bello), “algarrobilla”, “algarroba”, “aywon pinic”, “impanta”, “algarroba paiva”, “algarrobo panta”, “cama tala”, “cama tale” e “ibopé”.

Su nombre vulgar posiblemente más utilizado, “algarrobo”, proviene originalmente de los conquistadores españoles, que compararon este árbol, presumiblemente por sus vainas comestibles, con el algarrobo europeo (*Ceratonia siliqua* L.), cuyas vainas también son comestibles. Ambos árboles pertenecen a la familia de las Fabáceas. *Prosopis alba* tal como se mencionó en la introducción pertenece a la subfamilia Mimosaceae.

Prosopis alba es un árbol que mide entre 8 y 15 m de altura, morfológicamente ha sido descrito por Burkart, (1976) con hojas tupidas de 1 a 3 yugas, glabras, pecioladas, con el raquis de 0,5 a 8 cm de longitud, pinnas con 25–50 yugas encorvadas. Los folíolos lineales rectos o levemente encorvados, agudos, subsésiles, de base asimétrica, miden de 0,5–1,7 cm de longitud por 1–2 mm de lado, subcoriáceos, glabros, con una distancia entre folíolos de 1,5 a 6 mm. La distancia entre nudos es de entre 20 a 30 cm. Es una especie espinosa, de ubicación axilar, cuyas espinas poseen una longitud de $2,7 \pm 0,99$ cm. Florece de octubre a diciembre y fructifica de diciembre a marzo, a veces hasta junio (Ignes, 2020). Sus frutos, legumbres indehiscentes, casi rectas, carnosas, dulces, que poseen semillas que presentan dormición física en su interior, pueden alcanzar los 30 cm de largo por 1,8 cm de ancho. Existe una relación directa de tamaño y peso de las semillas, así se encontró que entran aproximadamente 2540 semillas por 100 gramos de peso Galera, (2000).

La drástica disminución de los bosques de *P. alba* ha promovido el interés en usar a la especie en plantaciones, con el propósito de renovar el recurso productivo y de recuperar ecosistemas degradados. Por otro lado, a partir del año 2009 y ante la necesidad de contar con material mejorado para realizar plantaciones forestales uniformes que brinden material de alta calidad industrial principalmente por las exigencias de la Ley Nacional Argentina N° 25.080, comienzan distintas instituciones entre ellos INTA y Universidades Nacionales a orientar las investigaciones hacia *Prosopis alba*. (Verga *et al.*, 2009; Venier *et al.*, 2013; Verga *et al.*, 2013 y Marco *et al.*, 2016), trabajo que se intensificó aún más a partir del año 2013 en que se crea el Programa Nacional del Algarrobo (Resolución 244/2013). Hasta ese momento (2009) la mayor parte de las plantaciones realizadas en el país con *P. alba* no habían tenido manejo silvícola y se desconocía el material genético (semillas) que dieron origen a las plantaciones (Salto y Lupi, 2019). Palacios y Brizuela (2005) reconocen como principales problemas en las forestaciones con *P. alba*: la falta de semilla con certificación, el bajo éxito del establecimiento de los plantines y la heterogeneidad de las plantaciones logradas. En este contexto las investigaciones se centraron principalmente en estudios de domesticación de la especie.

La domesticación puede definirse como el proceso de creación de un recurso biológico, desarrollado a partir de una especie silvestre y destinado a satisfacer requerimientos humanos (Verga y Zárate, 2011). En el contexto actual este concepto ubica a los recursos biológicos únicamente como un medio para obtener bienes (productos) destinados al mercado, sin embargo la irrupción de la problemática del cambio climático global, como así también el profundo efecto sobre los ecosistemas que genera la actividad humana en general, obligan a considerar a los recursos biológicos también como un fin en sí mismos. La conservación, el uso y el mejoramiento se presentan como tres componentes indisolubles del proceso de domesticación y consigu traen la obligatoriedad de un abordaje interdisciplinario en los campos de la genética, la ecofisiología, la ecología y la silvicultura. Estos campos deben interactuar sobre un mismo objeto: los recursos genéticos forestales nativos, dirigiendo sus esfuerzos tanto para el desarrollo de sistemas productivos como para su conservación dinámica que garantice los servicios ambientales de los ecosistemas y la sustentabilidad de la producción (Verga y Zárate, 2011; Joseau *et al.*, 2013). Es en este sentido que se han

dirigido los avances e investigaciones sobre la especie en los últimos años, reconociendo a la variabilidad genética de las especies y poblaciones como requisito fundamental para la obtención de ganancias en los programas de mejoramiento (López, Maldonado y Salim, 2001). Así, conservar la diversidad genética de las poblaciones forestales es de vital importancia, ya que constituye el material base de la evolución en general y de la adaptabilidad a los cambios ambientales en particular (Gallo, Marchelli, Pastorino, Izquierdo, y Azpilicueta, 2005).

Prosopis es uno de los géneros que ha tenido grandes avances en investigaciones sobre domesticación en recursos forestales nativos argentinos, contando en la actualidad con 24 materiales inscripto en el Instituto Nacional de Semillas (INASE), de los cuales 3 se encuentran inscriptos como rodales semilleros y los restantes como áreas productoras de semillas, y 11 de los 24 pertenecen a *P. alba*. (INASE, 2021). Existe en la actualidad un protocolo de caracterización para la inscripción de los materiales como rodales semilleros (RS INASE 374/2014), debiendo para esto realizar una caracterización genética y morfológica de los materiales a inscribir.

En relación a la caracterización de las especies del género y en particular de *P. alba* se han realizado grandes avances, llegando a caracterizar 5 “morfotipos” de la especie para Argentina. Verga *et al.* (2009), a través de la medición y caracterización de 452 materiales de *P. alba* distribuidos en la región Chaqueña y Espinal norte, y mediante la utilización de 12 variables morfológicas y 7 de frutos, lograron identificar tres “morfotipos” llamados “Chaqueño Norte”, “Chaqueño Sur” y “Santiagoño”; e identificaron un individuo “virtual” con los valores promedios de todos los árboles medidos por morfotipo, denominado “árbol tipo”. En trabajos posteriores Verga (2014) y Marcó *et al.* (2016) describen valores de caracteres morfológicos y muestran hojas de “árboles tipo” para 5 morfotipos de *P. alba* (“Chaqueño Sur”, “Santiagoño”, “Bermejo”, “Salta Norte” y “Espinal”), obtenidos a través de la medición de 13 caracteres morfológicos de hojas.

La presente tesis pretende dar continuidad a las investigaciones que se vienen realizando en domesticación de *P. alba*. Principalmente se pretende llegar a comprender cómo las condiciones ambientales de crecimiento (actual y futuras) producen adaptaciones de las poblaciones de diferentes orígenes a nivel de germinación, fenología

y taxonomía. Para esto, se planteó un diseño que permitió el estudio de la correlación de patrones espaciales tanto morfológicos como ambientales (evidencia correlacional) a través de una aproximación experimental (ensayo de progenie a campo, y ensayos de estrés hídrico sobre semilla en laboratorio). La Figura 1.1 presenta un esquema secuencial de las etapas incluidas en este trabajo de tesis. Puede observarse que el análisis comienza con una caracterización geográfica y climática de la distribución actual complementada a través de un muestreo de la zona con menor cantidad de datos de presencia de la especie. Integrando esta caracterización en modelos de distribución se definió el nicho actual de la especie. De la zona muestreada se realizó una caracterización morfológica y edáfica. Se realizó un análisis de la variación adaptativa a nivel de semilla en ensayos de laboratorio y de brotación en ensayo de progenie. Sobre la base de los resultados obtenidos, se finalizó este estudio con una predicción del impacto del cambio climático sobre la distribución futura de la especie.

En relación a la caracterización geográfica, existen numerosos autores e instituciones que han contribuido en la definición de la distribución de la especie (Burkart, 1976; Roig, 1993; Ferreyra, 2000; Joseau, 2006; Verzino, Frassoni, Joseau, Clausen y Navarro, 2019), incluso algunos autores han volcado los datos de presencia en plataformas o programas a modo de base de datos (Verzino *et al.*, 2005a; Verga, 2002). Más recientemente la distribución se ha asociado a la caracterización climática de la especie surgiendo las técnicas de modelado del nicho ecológico, que representan cartográficamente la idoneidad de hábitat de un área para el desarrollo de poblaciones de una especie a partir de sus datos de presencia (o ausencia) y en función de diferentes variables ambientales (clima, suelo, etc.) (Araujo y Guisan, 2006; Varela *et al.*, 2014). Existen varios algoritmos que pueden utilizarse en el modelado de nicho, tales como BIOCLIM, DOMAIN y MaxEnt. En el género *Prosopis* algunos autores han utilizado estos algoritmos para modelar su distribución: Kees *et al.* (2013) y Verga *et al.* (2013) utilizaron el algoritmo BIOCLIM, mientras que Venier *et al.* (2013) utilizó MaxEnt, sin embargo no se han encontrado trabajos que modelen a *P. alba* en todo su rango de distribución.

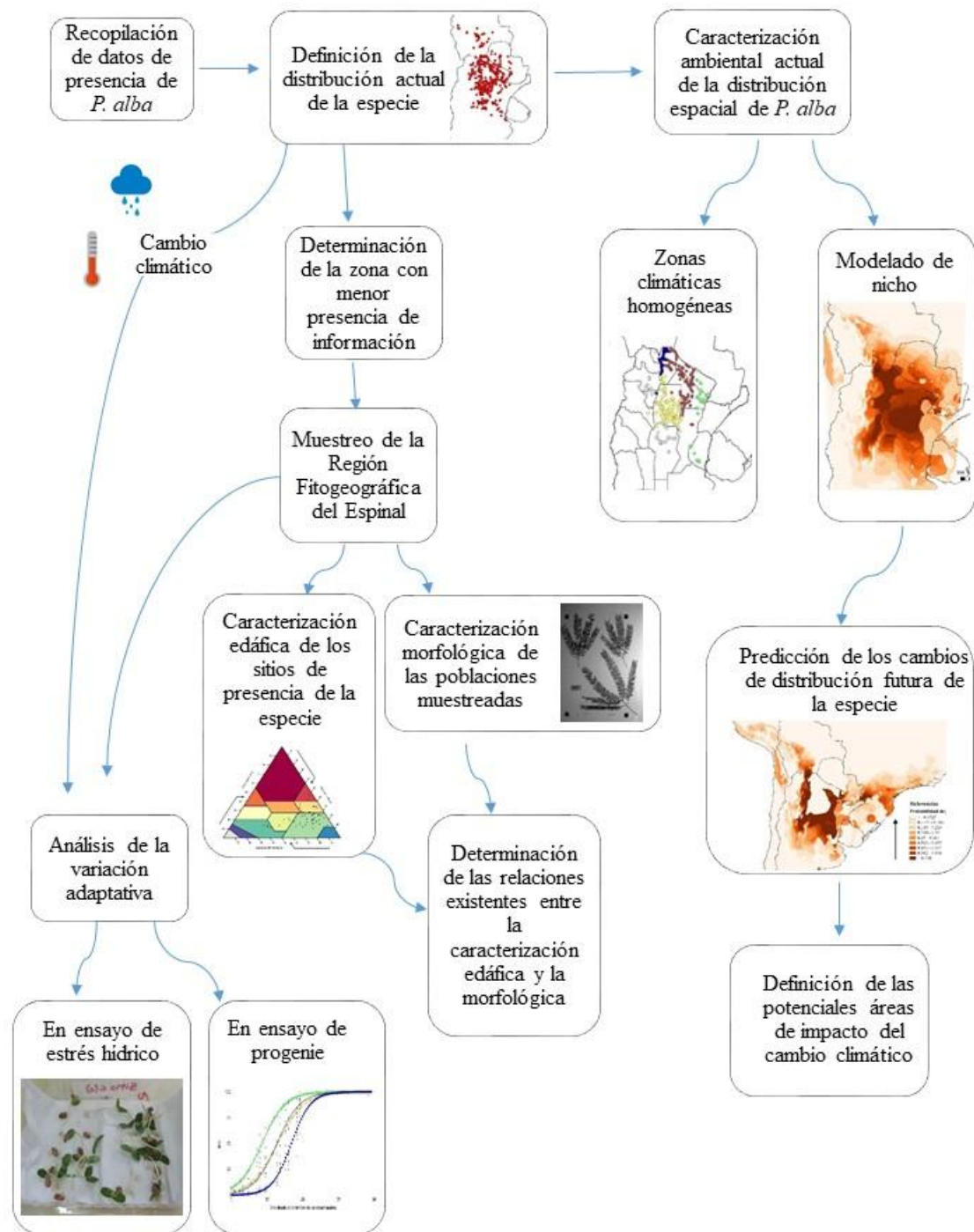


Figura 1.1. Mapa de interrelaciones de los contenidos trabajados en la tesis.

En relación a la caracterización morfológica se pretende dar continuidad a los estudios realizados por Verga *et al.* (2009), Verga (2014) y Marcó *et al.* (2016), complementando las descripciones para la región fitogeográfica del Espinal (zona menos muestreada de la distribución y que cuenta con la menor cantidad de datos de presencia de la especie). Al mismo tiempo se realizó una descripción de los perfiles de

suelo en que las poblaciones muestreadas se presentan, a fin de conocer las características de los sitios de presencia de *P. alba*. Al respecto, existen algunos avances relacionados con: el índice de sitio (Vicentini *et al.*, 2012; Pérez, 2014; Kees *et al.*, 2016, Kees *et al.*, 2017, Kees *et al.*, 2018 y Gracia Senilliani, Bruno y Brassiolo, 2020) y que relacionan el componente edáfico y la morfología de las poblaciones (Verga *et al.*, 2013), pero no se han encontrado investigaciones que analicen el componente edáfico de la distribución de *P. alba* en la región fitogeográfica del Espinal.

La variación adaptativa, entendiendo esta como los cambios que en determinada especie (o población de individuos que pertenecen a una especie) se producen en reacción a cambios ambientales (Corral Aguirre, 2011), cambios que, si se efectúan, permiten que sobreviva la población, son motivos de análisis de una disciplina específica: la genecología, definida como el estudio de la variación intraespecífica en relación a las condiciones ambientales (Aitken 2004). En esta disciplina es muy frecuente la utilización de ensayos de ambientes común ya sea en laboratorio, vivero, o a campo, un ejemplo muy común a nivel forestal son los ensayos de procedencias. En este tipo de ensayos se busca evaluar rasgos de relevancia adaptativa como momentos de brotación, resistencia al frío, resistencia a estrés hídrico (Rehfeldt 1986 y Pastorino *et al.* 2010). En la presente investigación se realizó en: laboratorio, bajo condiciones controladas un estudio que analiza el proceso de germinación de diferentes orígenes bajo distintas condiciones de estrés hídrico y temperaturas; y en ensayo de progenie, a través de un análisis de la variación adaptativa según estrategias de brotación de poblaciones de *P. alba*.

Existen numerosas investigaciones que analizan el proceso de germinación y sus requerimientos en cuanto a condiciones hídricas (Cony y Trione, 1998), salinas (Bazzaz, 1973); Catalán *et al.*, 1993) y de temperatura (Sosebee y Wan, 1987; Catalán y Balzarini, 1992, Cony y Trione, 1996) para algunas especies del género *Prosopis*. En particular, en relación al cambio climático, la alteración ambiental dificulta la implantación exitosa de especies de algarrobo como lo presenta Tapia *et al.* (2011). Diversos autores (Gonzalez, 2007; Sayar *et al.*, 2010; Suárez *et al.*, 2014) han realizado estudios en leguminosas a diferentes potenciales osmóticos con polietilenglicol (PEG), mostrando simular satisfactoriamente el efecto de sequía durante la germinación y emergencia de la semilla y obteniendo resultados positivos. Los autores mencionados

analizaron este proceso a diferentes potenciales osmóticos con una sola temperatura de germinación, y Rodríguez Rivera *et al.* (2007) lo realiza a diferentes temperaturas, dando un mayor abanico de respuestas. Es de destacar que todos los ensayos enumerados tanto de germinación a diferentes potenciales osmóticos, como temperaturas han sido realizados en laboratorio debido a que está comprobado que los resultados de germinación obtenidos en laboratorio pueden ser usados para predecir la germinación a campo (Passera, 2000), ya que existe una correlación, alta y positiva entre la tasa de germinación en soluciones osmóticas y la tasa de emergencia a campo (Mohammadkhani y Heidari, 2008). Sin embargo estas investigaciones no se han realizado para *P. alba*, por lo que estudios de este tipo contribuirán a tener mayores escenarios frente a las variaciones de las condiciones climáticas que vienen aconteciendo, como así también permitirá seleccionar material apto para dar respuestas a los planes de forestación y conservación exigidos por las actualmente vigentes Leyes N° 25.080 y 26.331 sobre bosques cultivados y nativos a nivel nacional. La especie *P. alba* produce semilla de buen poder germinativo que se mantiene por mucho tiempo, por lo que se adapta sin inconveniente al cultivo, y sus recursos genéticos son de relativa fácil conservación *ex-situ* (Joseau *et al.*, 2013; Verzino y Joseau, 2005). A nivel de cultivo *P. alba* se destaca por sus características ecofisiológicas, bajo requerimiento en fertilidad de suelos, tolerancia a suelos salinos y alta adaptación a condiciones extremas de temperatura, por lo que no compite con otras actividades productivas (Navall *et al.*, 2015).

El dimensionamiento del impacto del cambio climático en la especie se realizó a través de modelos predictivos de distribución basados en modelos de nicho ecológicos ya descriptos con anterioridad. Estos modelos predictivos tiene diferentes usos potenciales, ya que pueden utilizarse para presentar escenarios de la distribución geográfica de las especies, identificando la dirección del cambio y con menor certeza la magnitud (Guisan y Thuiller, 2005; Vázquez, 2005); pero también constituyen una herramienta valiosa en el estudio del cambio climático y la biodiversidad, ya que pueden generar estudios de base para identificar las especies más vulnerables al cambio climático, así como aquellas especies que pueden ser beneficiadas (Bravo Cadena *et al.*, 2011). Esta información puede ser utilizada para generar a nivel nacional y provincial, diversas estrategias de conservación y/o manejo de los recursos naturales (SAyDS, 2015). La limitante más importante para la producción de los modelos predictivos es la

disponibilidad de datos a resoluciones finas, tanto climática como biológica, para períodos y sitios específicos (Bravo Cadena *et al.*, 2011). Actualmente, se encuentran disponibles escenarios de cambio climático, calculados sobre dos horizontes temporales: clima futuro cercano (2015-2039), y clima futuro lejano (2075-2099), ambos elaborados en el marco de la CMIP5 (Taylor *et al.*, 2012) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas. La tendencia general en cuanto a las respuestas de las especies al cambio climático en términos de distribución, si bien existe cierta variación, muestra principalmente un corrimiento de los rangos de distribución hacia latitudes altas (Godoy Bürki, 2016; Márquez Linares *et al.*, 2006; Parmesan *et al.*, 1999) o zonas de mayor altitud (Chen *et al.*, 2009; Toranza *et al.*, 2016), ocasionando efectos tales como aislamiento, fragmentación y pérdida de hábitats favorables (Romo *et al.*, 2013), cambios que se intensificarán en las próximas décadas (Diffenbaugh y Field, 2013). Con respecto a las proyecciones realizadas en el género *Prosopis* existen trabajos que modelan la distribución de *Prosopis flexuosa* D.C. en la provincia biogeográfica del Monte (Perosa *et al.*, 2014), de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnstonen (Palacios Romero *et al.*, 2016), de *P. hassleri* Harns en la provincia de Formosa (Kees, 2013), de *P. alba* y *P. hassleri* en la Región Chaqueña (Venier *et al.*, 2013), pero no hay evidencias de estudios sobre la distribución completa de *P. alba* por lo que resulta necesario profundizar las investigaciones en el área.

HIPÓTESIS

- *P. alba* es afectada por el cambio en las condiciones ambientales de su distribución, produciendo adaptaciones de las poblaciones de diferentes orígenes geográficos a nivel de fenología y germinación.
- Existen variables climáticas de mayor importancia en la definición de nicho actual de la especie, con las cuales es posible predecir la distribución futura

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Caracterizar la variación morfológica y adaptativa de poblaciones y progenies de *Prosopis alba* Grisebach del Parque Chaqueño argentino y Espinal frente al cambio climático.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la distribución espacial y climática actual de *P. alba* de crecimiento espontáneo y modelar su nicho de distribución.
- Caracterizar morfológica y edáficamente las poblaciones de crecimiento espontáneo de *P. alba* en la región fitogeográfica del Espinal.
- Estudiar la variación adaptativa de *Prosopis alba* mediante la caracterización de estrategias de brotación en ensayos de progenie y tolerancia al estrés hídrico a nivel de semilla de poblaciones de orígenes contrastantes.
- Definir potenciales áreas de impacto del cambio climático sobre las poblaciones de *P. alba*.

BIBLIOGRAFÍA

- Aitken S. N. 2004. Genecology and Adaptation of Forest Trees. Genetics and genetic resources. Elseviere. 197- 204
- Araujo, M.B. y Guisan, A. (2006) Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of biogeography*, **33**, 1677-1688.
- Argentina. Ley n° 25.080, de 16 de Diciembre de 1998. Sanción de la Ley de Inversión para Bosques Cultivados. Buenos Aires: Presidencia de la Nación, (1998). Disponible en: <http://www.maa.gba.gov.ar/2010/SubPED/Agricultura/archivos/ley-25080.pdf>. Acceso en: Agosto 2020.
- Backlund, P., Janetos, A., Schimel, D., Hatfield, J., Boote, K., Fay, P. (2008) The effects of climate change on agriculture, land resources, water resources, and biodiversity in the United States. A Report by the US Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. *US Department of Agriculture, Washington, DC, USA. Available at.*
- Bazzaz, F.A. (1973) Seed Germination in Relation to Salt Concentration in Three Populations of *Prosopis farcta*. *Oecologia*, **80**.
- Bravo Cadena, J., Sánchez Rojas, G. y Gelviz-Gelvez, S.M. (2011) Estudio de la distribución de las especies frente al cambio climático.
- Burkart, A. (1976) A monograph of the genus *Prosopis* (Leguminosae subfam. Mimosoideae). *Journal of the Arnold Arboretum*, 450-525.
- Catalán, L.A. y Balzarini, M. (1992) Improved laboratory germination conditions for several arboreal *Prosopis* species: *P. chilensis*, *P. flexuosa*, *P. nigra*, *P. alba*, *P. caldenia* and *P. affinis*. *Seed science and technology*, **20**, 293-298.
- Catalán, L., Balzarini, M., Taleisnik, E. y Sereno, R. (1993) Effects of salinity on germination and seedling growth of *Prosopis flexuosa* (D . C .). *Forest Ecology and Management*, **63**.
- Catalán, L.A., Lara Rico, R., Ribaski, J., Lima, P.C., Serra, M.T., Sosa Cedillo, V.E. (1997) *Especies arbóreas y arbustivas para las zonas áridas y semiáridas de América Latina*. FAO-PNUMA.
- Chen, I.-C., Shiu, H.-J., Benedick, S., Holloway, J.D., Chey, V.K., Barlow, H.S. (2009) Elevation increases in moth assemblages over 42 years on a tropical mountain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**, 1479-1483.
- Cony, M. A., y Trione, S. O. (1996). Germination with respect to temperature of two Argentinian *Prosopis* species. *Journal of Arid Environments*, **33**(2), 225-236.
- Cony, M.A. y Trione, S.O. (1998) Inter-and intraspecific variability in *Prosopis flexuosa* and *P. chilensis*: seed germination under salt and moisture stress. *Journal of Arid Environments*, **40**, 307-317.
- Cordero, D. (2011). *Los bosques en América Latina*. Friedrich-Ebert-Stiftung.

- Corral Aguirre, J. 2011. La variación: manantial de especies. *Revista de divulgación científica y tecnológica de la universidad veracruzana*. XXIV (1)
- de Galindez, M.J., Giménez, A.M., Ríos, N. y Balzarini, M. (2005) Modelación de crecimiento en *Prosopis alba* Griseb. empleando dos modelos biológicos. *Quebracho-Revista de Ciencias Forestales*, 34-42.
- Diffenbaugh, N.S. y Field, C.B. (2013) Changes in ecologically critical terrestrial climate conditions. *Science*, **341**, 486-492.
- FAO. 2009: Situación de los bosques del mundo 2009. FAO, Roma, Italia
- FAO y PNUMA 2020. El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca8642es>
- Ferreira, L.I. (2000) Estudio de la variabilidad y la diferenciación genética por medio de técnicas de Isoenzimas y RAPD en poblaciones naturales de especies e híbridos del Género *Prosopis* (Leguminosae). Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Gallo, L. A., Marchelli, P., Pastorino, M. J., Izquierdo, F., y Azpilicueta, M. (2005). Programa de conservación y utilización de los recursos genéticos. especies forestales nativas patagónicas. *Idia XXI. revista de información sobre investigación y desarrollo agropecuario.*, 5(8), 157-163.
- Galera, M.F. (2000) *Los algarrobos: las especies del género Prosopis (algarrobos) de América Latina con especial énfasis en aquellas de interés económico*. Gráficas, Graziani.
- Garau, A., de Delfino, S.F. y Berrondo, G. (2008) Influencia de factores climáticos en las fechas de inicio de floración y brotación de clones de álamo en el Delta del Paraná, Argentina. *Forest Systems*, **9**, 169-176.
- Godoy Bürki, A.C. (2016) Efectos del cambio climático sobre especies de plantas vasculares del sur de los Andes Centrales: un estudio en el noroeste de Argentina (NOA).
- Gonzalez, D. (2007) Tolerancia al estrés salino del vinal (*Prosopis ruscifolia*): germinación, crecimiento y ajuste osmótico.
- Gracia Senilliani, M., Bruno, C., y Brassiolo, M. (2020). Factores edáficos y su impacto en la altura dominante en plantaciones de *Prosopis alba*. *Madera y bosques*, 26(3).
- Guisan, A. y Thuiller, W. (2005) Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology letters*, **8**, 993-1009.
- Hughes, L. (2000) Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? *Trends in ecology & evolution*, **15**, 56-61.
- Hunziker, J.H., Saidman, B.O., Naranjo, C.A., Palacios, R.A., Poggio, L. y Burghardt, A.D. (1986) Hybridization and genetic variation of Argentine species of *Prosopis*. *Forest ecology and management*, **16**, 301-315.
- Ignes, V. P. (2020). Los modelos de distribución geográfica y su uso en la colecta de germoplasma de especies nativas: una evaluación con *Prosopis alba*. *Lhawet*, 6(6).
- INASE. 2021. Guía de consulta de materiales básicos forestales, semillas y materiales

de propagación agámica.
https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/inase_guia_forestal.pdf). Acceso el 10 de Junio de 2021.

- IPCC, I.P.O.F.C.C. (2007) Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IPCC. (2019). *Climate Change and Land: in IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [Shukla, P.R.; Skea, J., Calvo, E., Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (eds.)]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/srccl/>. Acceso el 23 de Junio de 2021
- Joseau, M.J. (2006) *Caracterización morfológica y genética de poblaciones del género Prosopis del Chaco semiárido del norte de Córdoba y sur de Santiago del Estero. Tesis para optar al grado de Doctora en Ciencias Agropecuarias*. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Univeridad Nacional de Córdoba.
- Joseau, M.J., Verga, A., Díaz, M. del P. y Julio, N.B. (2013) *Morphological diversity of populations of the genus Prosopis in the semiarid Chaco of northern Cordoba and southern Santiago del Estero*. Scientific Research.
- Karlin, M.S., Karlin, U.O., Coirini, R.O., Reati, G.J. y Zapata, R.M. (2013) *El chaco árido*. Marcos Sebastián Karlin.
- Kees, S.M., Gómez, C.A., Vera, M.A., Cardozo, F., López, D., Muttoni, F. (2013) Predicción del área de distribución natural de *Prosopis hassleri* en la provincia de Formosa–Argentina.
- Kees, S.M., Michela, J.F., Skoko, J.J., Gomez, C.A., Crechi, E.H. y Letourneau, F.J. (2016) Índice de Sitio para *Prosopis alba* en la Provincia del Chaco. *Actas de los resúmenes de las xvii Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales*.
- Kees, S.M., López, A.E., Rojas, J.M., Roldán, M.F., Zurita, J.J. y Brest, E.F. (2017) Características edáficas y su relación con la altura dominante en plantaciones de *Prosopis alba* en la provincia del Chaco. *Revista Forestal Yvyrareta*, **24**, 13-19.
- Kees, S.M., Ferrere, P., Lupi, A.M., Michela, J.F. y Skoko, J.J. (2018) Producción y crecimiento de las plantaciones de *Prosopis alba* Griseb. En la provincia Chaco. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, **44**, 113-120.
- Ledesma, T., De Bedia, G. y López, C. (2008) Productividad de *Prosopis alba* Griseb en Santiago del Estero. *Quebracho-Revista de Ciencias Forestales*, 5-8.
- Lerner, I.M. (1954) Genetic homeostasis, I. Michael Lerner.
- Levins, R. (1968) *Evolution in changing environments: some theoretical explorations*. Princeton University Press.
- López, C., Maldonado, A., y Salim, V. (2001). Variación genética de progenies de *Prosopis alba*. *Forest Systems*, *10*(1), 59-68.

- Marcó, M.A., Cortizo, S.C., Fornes, L.F., Gauchat, M.E., López, J.A., López Lauenstein, D., (2016) *Domesticación y mejoramiento de especies forestales. 1a. ed. 201*
- Márquez Linares, M.A., Jurado Ybarra, E. y González Elizondo, S. (2006) Algunos aspectos de la biología de la manzanita (*Arctostaphylos pungens* HBK) y su papel en el desplazamiento de bosques templados por chaparrales. *Ciencia UANL*, **9**.
- Millennium ecosystem assessment, M. E. A. (2005). *Ecosystems and human well-being* (Vol. 5). Washington, DC: Island Press.
- Mohammadkhani, N. y Heidari, R. (2008) Water Stress Induced by Polyethylene Glycol 6000 and Sodium. *Pak. J. Biol. Sci*, **2**, 92-97.
- Navall, M., Ewens, M., Senilliani, G. y Lopez, C. (2015) Efectos de la poda en plantaciones jóvenes de *Prosopis alba* Griseb en Santiago del Estero, Argentina. *Quebracho-Revista de Ciencias Forestales*, **23**, 77-91.
- Palacios, R., y Brizuela, M. (2005). *Prosopis*: historia y elementos para su domesticación. *Agrociencia-Sitio en Reparación*, 9(1-2), 41-51.v
- Palacios Romero, A., Rodríguez Laguna, R., Flores, H., de la Luz, M., Jiménez Muñoz, E. y Tirado Torres, D. (2016) Distribución potencial de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) MC Johnston basada en un modelo de nicho ecológico. *Revista mexicana de ciencias forestales*, **7**, 35-46.
- Parmesan, C. (2006) Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, **37**, 637-669.
- Passera, C.B. (2000) Fisiología de *Prosopis spp.* *Multequina*, **9**, 53-80.
- Pastorino, M. J., Ghirardi, S., Grosfeld, J., Gallo, L. A., y Puntieri, J. G. (2010). Genetic variation in architectural seedling traits of Patagonian cypress natural populations from the extremes of a precipitation range. *Annals of Forest Science*, **67**(5), 508-508.
- Pérez, V.R. (2014) Caracterización Edafológica y Silvicultura de Forestaciones de *Prosopis alba* de la Provincia de Formosa. *Producción Forestal*, **4**, 28-32.
- Perosa, M., Rojas, J.F., Villagra, P.E., Tognelli, M.F., Carrara, R. y Alvarez, J.A. (2014) Distribución potencial de los bosques de *Prosopis flexuosa* en la Provincia Biogeográfica del Monte (Argentina).
- Peterson, A.T., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J., Bartley, J., Buddemeier, R.W. y Navarro-Sigüenza, A.G. (2001) Effects of global climate change on geographic distributions of Mexican Cracidae. *Ecological modelling*, **144**, 21-30.
- Potapov, P., Hansen, M. C., Laestadius, L., Turubanova, S., Yaroshenko, A., Thies, C., y Esipova, E. (2017). The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013. *Science advances*, **3**(1), e1600821.
- Rehfeldt, J. (1984) Microevolution of conifers in the northern Rocky Mountains: a view from common gardens. *8. north American forest biology workshop, Logan, Utah (USA)*, 30 Jul-1 Aug 1984 p. Dept. of Forest Resources, Utah State Univ.

- Rehfeldt, G. E. (1986). *Adaptive Variation in Pinus Ponderosa from Intermountain Regions: Middle Columbia River System. II* (Vol. 373). US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Resolución INASE- RS INASE 374 2014. (2014). https://www.inase.gov.ar/index.php?option=com_remository&Itemid=102&func=artdownload&id=2139. Acceso el 30 de Junio de 2021
- Rodríguez Rivera, M.F., Sosa, L.R., Fernández, E.A., Reale, M.I. y Villarreal, V. (2007) Efecto del estrés hídrico a distintas temperaturas sobre la germinación de semillas de *Bulnesia retama* (Gill. ex. Hook.) Griseb.-Zigofiláceas-en San Luis, Argentina.
- Roig, F.A. (1993) Informe nacional para la selección de germoplasma en especies de *Prosopis* de la República Argentina. *Contribuciones mendocinas a la Quinta Reunión Regional para América Latina y el Caribe de la Red de Forestación del CIID*, 1-37.
- Romo, H., Sanabria, P. y García-Barros, E. (2013) Predicción de los impactos del cambio climático en la distribución sobre las especies de lepidoptera. el caso del género *Boloria moore*, 1900 en la península Ibérica (Lepidoptera: Nymphalidae). *SHILAP Revista de lepidopterología*, **41**, 267-286.
- Salto, C.S. y Lupi, A.M. (2019) *Avances en el conocimiento y tecnologías productivas de especies arbóreas nativas de Argentina*. Ediciones INTA.
- Sayar, R., Bchini, H., Mosbahi, M. y Ezzine, M. (2010) Effects of salt and drought stresses on germination, emergence and seedling growth of durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *Journal of Agricultural Research*, **5**, 2008-2016.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. Resolución n° 244, de 14 de junio de 2013. Programa Nacional del Algarrobo. Buenos Aires: Ministerio de Producción y Trabajo, 2013. Disponible en: <http://programanacionaldelalgarrobo.blogspot.com.ar/p/el-programa.html>. Acceso en: 6 junio. 2021.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación- SAyDS. (2015) Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones.
- Sosebee, R.E., Wan, C., 1987. Plant ecophysiology: a case study of honey mesquite. Symposium on Shrub Ecophysiology and Biotechnology. Logan, Utah, pp. 103-117.
- Suárez, A.D., Hernández, Y.P., del Castillo, M.S., del Castillo, D.S. y Suárez, R.R. (2014) Efecto del estrés hídrico sobre la germinación de genotipos de frijol común en condiciones experimentales de sequía. *Avanzada Científica*, **17**, 53-67.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., y Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American meteorological Society*, **93**(4), 485-498.
- Tapia, F., Verzino G., y Vocos M. 2011 Regeneración de *Prosopis alba* (Griseb.) mediante dos técnicas de siembra directa; mezcla con piso de corral hidratado y dispersión con bovinos. Segundo congreso nacional de protección y manejo

sustentable del bosque nativo, Villaguay. Entre Ríos, 27 al 29 de octubre de 2011, p 73.

- Toranza, C., Brazeiro, A. y Maneyro, R. (2016) Anfibios amenazados de Uruguay: efectividad de las áreas protegidas ante el cambio climático. *Ecología austral*, **26**, 138-149.
- Trejo, M. (1983) Paleobiología y taxonomía de algunos fósiles mesozoicos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **44**, 1-22.
- Varela, S., Mateo, R.G., García-Valdés, R. y Fernández-González, F. (2014) Macroecología y ecoinformática: sesgos, errores y predicciones en el modelado de distribuciones. *Revista Ecosistemas*, **23**, 46-53.
- Vázquez, D.P. (2005) Reconsiderando el nicho hutchinsoniano. *Ecología austral*, **15**, 149-158.
- Venier, M.P., Cosacov Martinez, A., López Lauenstein, D., Vega, C. y Verga, A. (2013) Impacto del cambio climático sobre la distribución de *Prosopis Hassleri* y *P. alba* en la región chaqueña.
- Verga, A. (2002) Mapa Album. Mapa interactivo de la distribución de *Prosopis flexuosa* y *Chilensis*, disponible en CD.
- Verga, A., López, L., López, C., Navall, M., Joseau, J., Gómez, C. (2009) Caracterización morfológica de los algarrobos (*Prosopis sp.*) en las regiones fitogeográficas Chaqueña y Espinal norte de Argentina. *Quebracho*, **17**, 31-40.
- Verga, A., y Zárate, F. M. (2011). Domesticación de Especies Forestales Nativas. *Producción forestal (Buenos Aires-Argentina)*. (1(2), 14-19.
- Verga, A., López, C., Navall, M., Joseau, J., Gómez, C., Royo, O. (2013) Caracterización morfológica , distribución geográfica y estimación de nichos ecológicos de algarrobos (*Prosopis sp.*) en las regiones fitogeográficas Chaqueña y Espinal norte de Argentina. , 24.
- Verga, A. (2014) Rodales semilleros de *Prosopis* a partir del bosque nativo. *Quebracho-Revista de Ciencias Forestales*, **22**, 125-138.
- Verzino, E.G. y Joseau, M.J. (2005) El Banco nacional de germoplasma de *Prosopis*: conservación de recursos forestales nativos en Argentina.
- Verzino, G., Joseau, J., Dorado, M., Gellert, E., Rodríguez Reartes, S. y Nóbile, R. (2005) Impacto de los incendios sobre la diversidad vegetal, Sierras de Córdoba, Argentina. *Ecología Aplicada*, **4**, 25-34.
- Verzino, G., Joseau, M.J. y Coirini, R.O. (2012) Reunión Nacional del Algarrobo: Actas. *Reunión Nacional del Algarrobo (2012: nov. 15-16, Córdoba)* p. Encuentro Grupo Editor:
- Verzino, G., Frassoni, J., Joseau, M., Clausen, G., y Navarro, C. (2019). Conservación *ex situ*, *circa situ* e *in situ* realizada por el Banco Nacional de Germoplasma de *Prosopis*, Córdoba, Argentina. *Revista Nexa (NA-V7N1-9)*.
- Vicentini, G.M., Pérez, V. y Rhiner, G. (2012) Evaluación edafológica y silvicultural de forestaciones de *Prosopis alba* como base para una clasificación según calidades de sitio. *Reunión Nacional del Algarrobo*, 13-14.

Vié, J. C., Hilton-Taylor, C., y Stuart, S. N. (Eds.). (2009). *Wildlife in a changing world: an analysis of the 2008 IUCN Red List of threatened species*. IUCN.

CAPÍTULO II

CARACTERIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y CLIMÁTICA DE *P. alba* DE CRECIMIENTO ESPONTÁNEO

INTRODUCCIÓN

La distribución de *Prosopis* ha sido motivo de estudio desde hace décadas. Uno de los investigadores de mayor relevancia en este tema en particular, pero también muy importante en las descripciones de las especies del género fue Burkart, quien en 1976 publica: “*A monograph of the genus Prosopis (Leguminosae subfam. Mimosoideae)*”, donde presenta una revisión completa de las 44 especies de *Prosopis* (algarrobos americanos, mesquites y afines) en su distribución mundial, y distingue a Argentina como el país con mayor número de especies, 28 en total, de las cuales 13 son endémicas. En esta monografía Burkart (1976) describe la ubicación de alrededor de 56 ejemplares de *P. alba* encontrados en Argentina haciendo una primera aproximación de su distribución.

Otros autores realizaron valiosos aportes al conocimiento de la especie. Roig (1993) refleja en un mapa los contornos de la distribución de *P. alba* en base a individuos determinados morfológicamente por taxonomía clásica. Galera (2000) describe la especie y define su distribución en Argentina en la zona centro y norte del país, correspondiente a las provincias fitogeográficas Chaqueñas, Espinal, y sector noroeste de la provincia fitogeográfica del Monte mediante relevamiento bibliográfico. Sin embargo en el caso de la provincia de Monte se trata de intrusiones del Chaco semiárido, solo presente en números muy escasos y comportándose de manera marginal. En muestreos realizados en toda la extensión de la provincia del Monte, Roig (1993), sólo detectó muy escaso número de ejemplares de *P. alba*, mientras que Villagra, (1993) lo cita para Tilciao en Catamarca. Ferreyra (2000), en su tesis de doctorado describe la ubicación de siete individuos de *P. alba* en las provincias de Salta, Tucumán y Santiago del Estero caracterizados por sistemática clásica y genética; mientras que Joseau (2006) describe la ubicación geográfica de seis individuos de *P. alba* con caracterización por

taxonomía numérica y genética en el Semiárido del norte de Córdoba y el sur de Santiago del Estero. A nivel de instituciones, la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba a través del Banco Nacional de Germoplasma de *Prosopis* posee registros de 1106 árboles o rodales cosechados entre los años 1985 y 2019 (Verzino, Frassoni, Joseau, Clausen y Navarro, 2019). Entre los registros se encuentran datos de ubicación, característica alométricas, especies acompañantes, características del sitio o el rodal, accesibilidad y un croquis de ubicación marcando hitos importantes para su localización.

En relación a los estudios de distribución y bases de datos Ruiz Posse y Dorado en 1999 (Verzino *et al.*, 2005a) elaboraron un SIG para la región de las Sierras de Córdoba y Traslasierra, utilizando para esto el programa IDRISI. Verga (2002) creó un programa interactivo y gratuito denominado MAPA ALBUM, en donde los ejemplares georeferenciados de *P. chilensis* y *P. flexuosa* distribuidos en un mapa de Argentina se asocian a información relevante del sitio, foto del ejemplar, caracteres morfológicos (hojas y frutos) e isoenzimáticos. Por otro lado, en la actualidad, existen plataformas con acceso a datos de biodiversidad libre y gratuito, como Flora Argentina y del Cono Sur (Zuloaga y Belgrano, 2015), Species Link (SPECIES, 2017), Tropicos (TROPICOS, 2018) y Global Biodiversity Information Facility- GBIF (GBIF, 2019), donde se puede descargar datos de presencia para enriquecer las bases de datos con mayor cantidad de puntos de presencia.

Las técnicas de modelado del nicho ecológico que permiten representar cartográficamente la idoneidad de hábitat de un área, para el desarrollo de poblaciones de una especie a partir de sus datos de presencia (o ausencia) en función de diferentes variables ambientales (clima, suelo, etc.) (Araujo y Guisan, 2006; Varela *et al.*, 2014), constituye una herramienta útil para comprender las tendencias de la biodiversidad a gran escala (Romo *et al.*, 2013). Así los modelos de los requisitos ambientales de las especies pueden ser aplicados a otras regiones u otros tiempos (pasado o futuro) para inferir las posibles regiones adecuadas para dicha especie (Guisan *et al.*, 2014; Anderson, 2015). El modelado de nicho ecológico es probablemente el método más adecuado que actualmente existe para estimar la distribución geográfica real y potencial de las especies (Guisan y Thuiller, 2005). Este enfoque se utiliza cada vez más en la toma de decisiones en materia de conservación, restauración y contaminación ambiental

(Ibarra-Montoya *et al.*, 2012) al permitir identificar áreas favorables para la permanencia de una especie, a la vez que también puede utilizarse para identificar zonas aptas para introducir especies de alto valor ecológico o económico (Reynoso Santos *et al.*, 2018).

Existen varios algoritmos que pueden utilizarse en el modelado de nicho (BIOCLIM, DOMAIN y MaxEnt), cada uno utiliza un límite ambiental diferente para definir la presencia de la especie a trabajar. BIOCLIM define los límites ambientales para un taxón o especie como el volumen rectangular en el espacio Euclidiano (Carpenter *et al.*, 1993), DOMAIN usa las distancias en el espacio ambiental entre los puntos de un mapa con los puntos de presencia para asignar un valor de clasificación (Carpenter *et al.*, 1993) y Maxent aplica el principio de máxima entropía sobre datos de presencias para estimar un conjunto de funciones que relacionan las variables ambientales y la aptitud del hábitat con el fin de aproximar el nicho de una especie con su distribución geográfica potencial (Phillips, 2006). Hay estudios que realizan comparaciones entre los métodos (Elith *et al.*, 2006; Peterson *et al.*, 2011; Booth *et al.*, 2014) y describen al utilizado por MaxEnt particularmente eficaz cuando los datos de presencia de las especies comprenden registros de solo presencia (Franklin *et al.*, 2013; Romo *et al.*, 2013).

Se han realizado estudios del género *Prosopis* en relación a la temática. Kees *et al.* (2013) modeló el área de distribución natural de *Prosopis hassleri* Harms en la provincia de Formosa utilizando las variables bioclimáticas de la base de datos de Worlclim y el método BIOCLIM, Verga *et al.* (2013) estableció el área de distribución geográfica de *Prosopis flexuosa*, *Prosopis chilensis*, *Prosopis nigra* “Santiagoño”, *Prosopis nigra* “Espinal Norte”, *Prosopis alba* “Santiagoño”, *Prosopis alba* “Chaqueño Norte” y *Prosopis alba* “Chaqueño Sur”, mediante la utilización del procedimiento “PREDICT” del módulo “ECOLOGICAL NICHE MODELING” del programa DIVA-GIS (Hijmans *et al.*, 2001) en función de parámetros ambientales siguiendo el método BIOCLIM. La información climática utilizada fue una grilla de resolución de 2,5 minutos de grado de latitud y longitud para todo el globo, realizada en base a registros climatológicos de la serie 1950 – 2000 (Hijmans *et al.*, 2005a). Venier *et al.* (2013) definieron un modelo de nicho para *P. alba* “santiagoño”, *P. alba* “chaqueño norte”, *P. alba* “chaqueño sur” y *P. hassleri* en la Región Chaqueña

utilizando el programa DIVA-GIS (Hijmans *et al.*, 2005b) y el algoritmo de máxima entropía implementado en el programa MaxEnt (Phillips, 2006) utilizando 19 parámetros bioclimáticos de la base de datos mundial WorldClim Global Climate GIS (Hijmans *et al.*, 2005a).

Kees (2013) y Verga *et al.* (2013) utilizaron el algoritmo BIOCLIM que lleva en algunos casos a predicciones ecológicamente erróneas (Booth, 1990; Li y Wang, 2013). Por ejemplo, Carpenter *et al.*, (1993) realizó comparaciones de modelos y, mostró las posibles inconsistencias que BIOCLIM ocasiona en el modelado de las distribuciones.

Otro factor importante que posibilita el desarrollo de los modelos de nicho en la actualidad lo constituyen los repositorios disponibles en internet que permiten descargar datos de variables ambientales, tal vez el más utilizado sea WorldClim, cuya versión más reciente fue desarrollada por Fick y Hijmans (2017). Estos repositorios, en conjunto con los de datos de biodiversidad están multiplicando los estudios relacionados con biología de la conservación, modelados de nicho y efectos del cambio climático (Varela *et al.*, 2014), sin embargo existen problemas relacionados a la desigual cobertura territorial y sus sesgos espaciales, la infrarrepresentación de algunas especies, o los errores tipográficos, taxonómicos y de georreferenciación de los datos de biodiversidad (Varela *et al.*, 2011; Varela *et al.*, 2014) que hace necesario que los modelos sean muchas veces acompañados de muestreos de poblaciones en la zona de estudio.

El objetivo de este capítulo fue caracterizar la distribución espacial y climática actual de *P. alba* de crecimiento espontáneo y modelar su nicho de distribución.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recopilación de datos de presencia de *P. alba*

El material de este estudio fueron los puntos de presencia de poblaciones o ejemplares de *P. alba* distribuidas entre los los 22 y 33 ° de latitud sur, 58 y 66 ° del longitud oeste en Argentina (provincias de Jujuy, Salta, Chaco, Formosa, Catamarca,

Tucumán, Santiago del Estero, Entre Ríos, Corrientes, Santa Fe, Buenos Aires, Córdoba y San Luis).

Se recabó información histórica de la distribución de *P. alba* para Argentina consultando estudios y registros previos: Burkart (1976), Roig (1993), Instituto Darwinion (Zuloaga *et al.*, 2009), Ferreyra (2000), Joseau (2006), y bases de datos-BNGP e INTA con datos de presencia de *P. alba* generando una nueva base de datos con todos los registros de *P. alba*. Los registros de BNGP fueron corroborados con sus planillas de cosecha, los cuales poseían observaciones sobre los lugares de recolección y en los casos posibles georreferenciados, ya que los datos previos al año 2000 las coordenadas de los puntos fueron determinadas por cartografía convencional por no contar con GPS, ni herramientas como Google Earth. La base de datos se utilizó para detectar la zona de distribución de *P. alba* con menor cantidad de puntos de presencia de la especie, área sobre la que se planificó realizar el muestreo de la presente tesis.

Detección de poblaciones de *P. alba* en la región fitogeográfica del Espinal

Analizando la base de datos generada y la ubicación de los puntos de presencia de la especie se encontró que la región fitogeográfica del Espinal era la zona donde existía la menor cantidad de poblaciones o individuos muestreados, por lo cual se definió ésta región como la zona de muestreo de la presente tesis y, se estableció como objetivo del muestreo poblaciones de *P. alba* de crecimiento espontáneo que se encontrasen diseminadas entre los 31 y 33 ° de latitud sur, 59 y 64 ° del longitud oeste. Las poblaciones difirieron en latitudes no mayores a 1° de distancia, según lo recomendado por Rehfeldt (1979, 1990, 1991) y Verzino *et al.* (2003). En los sitios muestreados se tomaron fotografías del paisaje y árboles muestreados, se recolectaron muestras de hojas, frutos, muestras de suelo y se registró longitud, latitud y altitud sobre el nivel del mar con GPS.

Muestreo a campo

Se procedió al análisis visual de imágenes de Google Earth en la región fitogeográfica del Espinal, en el cual se definieron poblaciones a muestrear. Se realizaron 6 viajes exploratorios, 3 en las temporadas 2016 y 3 en la temporada 2017, en

los cuales se corroboraron todos los puntos marcados y se muestrearon aquellos en que se encontraba una población compuesta al menos por 10 árboles separados 100 m entre sí (Verzino *et al.*, 2005; Bessega *et al.*, 2012), donde se coleccionaron muestras de hojas, frutos y muestras de suelo. Gran cantidad de los puntos marcados como bosque nativo por imágenes satelitales, al momento de verificarlo a campo, resultaron ser formaciones boscosas de especies exóticas o de bosque nativo sin presencia de algarrobos, quedando un vacío de poblaciones principalmente en la zona centro- sur del Algarrobal.

Determinación de zonas climáticas homogéneas de presencia de *P. alba*

Utilizando el programa Quantum-GIS (Quantum, 2016) se generó un sistema de información geográfico (SIG) de la base de datos de *P. alba* elaborada con información de su distribución en Argentina.

Siguiendo una de las metodologías planteadas por Parra-Quijano *et al.*, (2012a) para estudios de representación ecogeográficas de las especies, se descargaron 19 capas climáticas, correspondientes a 19 variables bioclimáticas, en una resolución de 5 minutos de las condiciones climáticas actuales (1960 - 1990) WorldClim v.1.4 (Fick y Hijmans, 2017) para cada punto de presencia de *P. alba*. Las variables bioclimáticas se detallan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Denominación, nomenclatura y unidad de medida de las 19 variables bioclimáticas (BIO) utilizadas para determinar las zonas climáticas homogéneas con presencia de *P. alba*

Nomenclatura	Variables Bioclimáticas (BIO)	Unidad de medida
BIO1	Temperatura media anual	(°C)
BIO2	Rango diurno medio	(°C)
BIO3	Isotermalidad (BIO2/ BIO7 x100)	
BIO4	Estacionalidad de temperatura	(CV, en %)*
BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido	(°C)
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío	(°C)
BIO7	Rango anual de temperatura (BIO5- BIO6)	(°C)
BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo	(°C)
BIO9	Temperatura media del trimestre más seco	(°C)
BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido	(°C)
BIO11	Temperatura media del trimestre más frío	(°C)
BIO12	Precipitación anual	(mm)
BIO13	Precipitación del mes más húmedo	(mm)
BIO14	Precipitación del mes más seco	(mm)
BIO15	Estacionalidad de precipitación	(CV, en %)*

BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo	(mm)
BIO17	Precipitación del trimestre más seco	(mm)
BIO18	Precipitación del trimestre más cálido	(mm)
BIO19	Precipitación del trimestre más frío	(mm)

*CV= Coeficiente de variación

Se realizó una exploración de datos con análisis de componentes principales (ACP) y un análisis de correlación entre las 19 variables obtenidas del World Clim que permitió reducir la cantidad de variables a utilizar para definir las zonas climáticas homogéneas de presencia de *P. alba*.

Mediante análisis estadísticos de conglomerados jerarquizados de las variables ambientales utilizando el método “UPGMA” basado en la distancia Euclídea entre individuos y conglomerados no jerarquizados, que informa la heterogeneidad dentro de los grupos en función del número de grupos generados, ambas herramientas del programa InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2018), se determinó el número de zonas climáticas homogéneas con presencia de *P. alba* para Argentina. La utilización del análisis discriminante (ADL) entre los grupos definidos por los conglomerados tanto jerarquizados como no jerarquizados permitió identificar el agrupamiento con menor tasa de error aparente.

Ajuste del modelo de nicho actual de *P. alba*

Se realizó el ajuste de modelo de nicho para todo el rango de distribución de la especie (poblaciones o ejemplares de *P. alba* distribuidas entre los 15- 36° de latitud sur y entre los 55- 70° del longitud oeste, en los países de Bolivia, Paraguay y Argentina-provincias de Jujuy, Salta, Chaco, Formosa, Catamarca, Tucumán, Santiago del Estero, Entre Ríos, Corrientes, Santa Fe, Buenos Aires, Córdoba y San Luis) siguiendo la estructura planteada en la Figura 2.1.

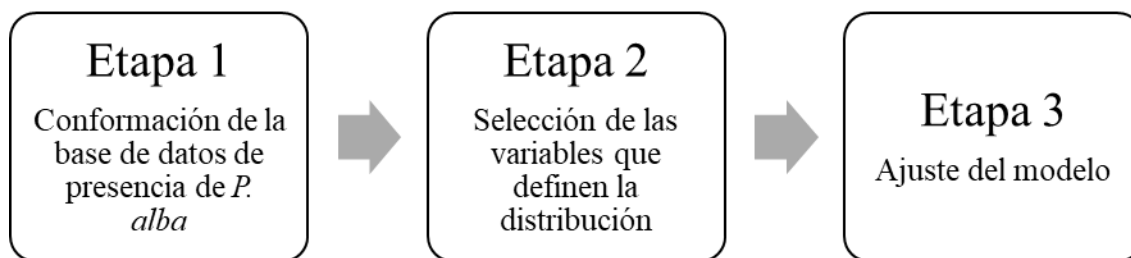


Figura 2.1. Etapas realizadas en el ajuste del modelo de nicho de *P. alba*

Conformación de la base de datos de presencia de *P. alba*. Al SIG elaborado en el primer punto (elaboración de un SIG de *P. alba* para Argentina) se incorporaron los puntos muestreados en la presente tesis y, se complementó la información con datos de presencia de la especie para toda su distribución extraídos del Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2019). Se eliminaron los datos de presencia duplicados, puntos cercanos en zonas sobre muestreadas con alta densidad de ejemplares sobre rutas y cercanos a ciudades (que no eran reflejo de una mayor densidad de la población sino de una preferencia de los recolectores) de modo que todas las áreas tengan igual importancia en términos de abundancia.

Utilizando el programa R (R Core Team, 2019) se transformaron las coordenadas de la base de datos creada en un objeto espacial (Latitud y Longitud) y a través de la función "*coordinates (xy)*" del paquete "*sp*" (Pebesma y Bivand, 2005) se rescataron las coordenadas espaciales del objeto espacial creado permitiendo la obtención de una base de datos en forma de objeto espacial que pueda ser graficada en el programa

Selección de las variables que definen la distribución. Las 19 variables bioclimáticas descargadas fueron agrupadas mediante la función "*stack*" y recortadas desde -36 a -15 grados de Latitud y desde -70 a -55 grados de Longitud (área M- área en donde se encuentra la especie o se supone que podría estar dado el conocimiento biológico que se tiene de ellas, de sus capacidades de dispersión, y por no existir grandes barreras ni discontinuidades ambientales que pudieran limitar su establecimiento, delimitada como la mínima extensión que comprende todos los puntos de la distribución de *P. alba* según la base de dato creada). Se creó una capa de 10.000 puntos al azar sobre el *stack* de las capas climáticas con lo cual se analizaron las correlaciones entre pares de variables a

través del índice VIF (índice de inflación de la varianza) función “*vifcor*” del paquete “*usdm*”(Naimi, 2015), dejando sólo las variables con VIF menor a 10.

Ajuste del modelo. El modelo de distribución de la especie se realizó utilizando el algoritmo MaxEnt (algoritmo basado en máxima entropía) que se encuentra entre los métodos más fiables de modelización (Elith *et al.*, 2006) tanto para predicciones basadas en condiciones actuales como futuras. Este algoritmo utiliza un método particularmente eficaz cuando los datos de presencia de las especies comprenden registros de solo presencia como en la presente tesis (Franklin *et al.*, 2013; Romo *et al.*, 2013). El modelo fue calibrado utilizando el programa R (R Core Team, 2019) y la librería “*ENMeval*” (Muscarella *et al.*, 2014), se probaron diferentes modelos calibrando los tipos de “*features*” y los coeficientes de regulación (β). Los “*features*” utilizados para la transformación de las variables climáticas fueron: “*linear*”; “*linear y quadratic*”; “*hinge*”; “*linear, quadratic y hinge*”; “*linear, quadratic, hinge y product*”; “*linear, quadratic, hinge, product y threshold*”; mientras que los coeficientes de regulación (β) utilizados fueron: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5 y 4.

Todos los modelos fueron calibrados con el algoritmo “*MaxEnt*”, utilizando 10.000, como número máximo de interacciones para el cálculo del modelo y 0,00001 (valor por defecto) como límite de convergencia, cifras que Phillips (2006) sugiere por ser conservadoras y garantizar la convergencia del modelo. La salida “*RAW*” fue utilizada para la selección del modelo ya que no depende de suposiciones post-procesamiento (Merow *et al.*, 2013). Se utilizó para la validación del modelo el método de partición de datos “*checkerboard1*” por ser más apropiado cuando la transferibilidad del modelo no es necesaria (Muscarella *et al.*, 2014). Como factor de agregación el valor seleccionado fue de 20 píxeles para todos los modelos.

La capacidad predictiva fue analizada teniendo en cuenta el mayor valor de la métrica “área bajo la curva” - AUC por sus siglas en inglés (*area under the curve*) que arroja ENMeval, métrica utilizada en modelos de distribución basados en algoritmos de solo presencia, donde predicciones 100 % correctas tendrán valores de AUC de 1, y predicciones 100 % incorrectas tendrán valores de 0. El umbral utilizado para identificar presencia fue una probabilidad igual a 0,5.

El modelo con mayor valor de AUC, se corrió en el programa MaxEnt (Phillips *et al.*, 2017b) usando la totalidad de los datos para calibrar. Se realizó la prueba de “*Jackknife*” para conocer las variables ambientales más importantes del modelo y para corroborar que las variables no tuvieran un comportamiento constante en la zona elegida. La salida elegida fue “*logistic*” ya que los mapas realizados con la salida “RAW” no suelen mostrar resultados ecológicos (Phillips *et al.*, 2017b), por esta razón MaxEnt tiene una opción de salida escalada en probabilidad de presencia (0 a 1) denominada “*logistic*” que fue la utilizada para los mapas de distribución final.

El modelo se proyectó a una zona geográfica de mayor amplitud (zona buffer), -45 a -10 grados de Latitud y -85 a -40 grados de Longitud, para que los cambios en contracción o expansión que se produzcan en el futuro por efecto del cambio climático sean visibles (Capítulo V- cambio climático).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Recopilación de datos de presencia de *P. alba*

La base de datos quedó conformada por 936 registros de presencia, 7 pertenecientes a la tesis de Ferreyra (2000), 5 de Joseau (2006), 5 al Instituto Darwinion (Zuloaga *et al.*, 2009), 34 a Burkat (1976), y los restantes (885) pertenecientes a registros del Banco Nacional de Germoplasma de *Prosopis* de la Facultad de Ciencias Agropecuarias (BNGP-UNC), donde están incluidos los registros del IFRGV-CIAP-INTA., desde el año 1986 al 2014.

El trabajo en compilación y depuración de datos constituye una base de información que aporta a los registros existentes de la especie, a la vez que se utilizó como punto de partida para detectar la zona de distribución de *P. alba* con menor cantidad de puntos de presencia de la especie, sobre la que se planificó el muestreo.

Detección de poblaciones de *P. alba* en la región fitogeográfica del Espinal- Muestreo a Campo

Se identificaron 22 sitios en los cuales se tomaron fotografías del sitio y árboles muestreados, recolección de muestras de hojas, frutos, muestras de suelo y se registró longitud, latitud y altitud sobre el nivel del mar con GPS. La Tabla 2.2 sintetiza la información más relevante de los sitios y la 2 muestra su ubicación geográfica. Los sitios muestreados se incorporaron al SIG elaborado. La caracterización morfológica de los sitios estudiados se presentan en el Capítulo III en lo que se refiere a vegetación y caracterización edáfica.

Tabla 2.2. Descripción de la cantidad y tipo de material colectado de *P. alba* por población en los muestreos realizados en las temporadas 2016 y 2017

Población	Denominación	Fecha de recolección	Árboles		
			Cantidad	Con hojas	Con frutos
1	Monte Cristo	Ene. 2016	10	10	6
2	Piquillín	Ene. 2016	3	3	2
3	Río I	Ene. 2016	11	11	10
4	Los Chañaritos	Ene. 2016	10	10	3
5	La Francia	Ene. 2016	11	11	2
6	Parq. San Martín	Ene. 2016	35	29	7
7	Colonia Nueva	Ene. 2016	10	10	3
8	Don Justiniano	Ene. 2016	12	12	4
9	Plaza de los Algarrobos	Feb. 2017	13	13	10
10	Parque de la Vida	Feb. 2017	13	13	12
11	U.C.C.	Feb. 2017	10	10	0
12	Este de RP 3	Ene. 2017	10	9	0
13	Balnearia	Ene. 2017	10	10	0
14	Norte en RP 70	Ene. 2017	12	6	0
15	Esperanza	Ene. 2017	11	11	0
16	Las Mojarras	Feb. 2017	11	11	4
17	RN 19, SF	Ene. 2017	7	2	0
18	Cañada de Machado	Feb. 2017	8	8	4
19	Villa del Rosario	Feb. 2017	11	11	8
20	Ballesteros	Feb. 2017	10	10	6

21	Bell Ville	Feb. 2017	10	10	5
22	Sur en RP 2	Feb. 2017	10	10	5
Total			241	228	91



Figura 2.2. Ubicación geográfica de las 22 poblaciones muestreadas en “El Algarrobal”

La incorporación del material de muestreo de la región fitogeográfica del Espinal, considerada una zona poco explorada por el BNGP, constituyó un aporte al cumplimiento del objetivo general que tiene el banco desde su creación en el año 1985: “*Conservar la variabilidad existente en especies del género Prosopis consideradas prioritarias*” (Verzino y Joseau, 2005) en lo que respecta a *P. alba*.

Determinación de zonas climáticas homogéneas de presencia de *P. alba*

Se generó un SIG con datos de presencia de árboles de registros georreferenciados de cosecha de *Prosopis alba* y 19 variables bioclimáticas extraídas del World Clim (Figura 2.3).

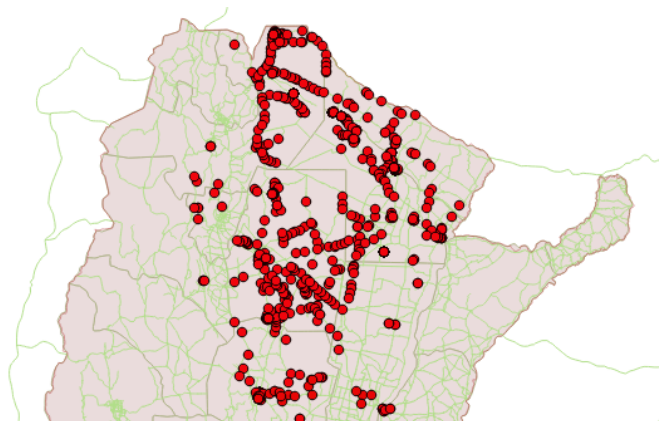


Figura 2.3. SIG con una única capa de presencia de *P. alba* asociada a 19 variables bioclimáticas.

Teniendo en cuenta que los SIG previamente publicados (Verga 2002; y Verzino y Joseau, 2005) fueron de otras especies y para superficies más reducidas, el elaborado en la presente tesis representa un avance en la disponibilidad de datos, además de haber sido elaborado con un programa libre que puede ser descargado y abierto por cualquier usuario.

El análisis exploratorio redujo la cantidad de variables de 19 variables climáticas a 16 variables, eliminándose la Precipitación del mes Más Seco, Precipitación del mes Más Húmedo e Isotermalidad ya que mediante el análisis de componentes principales (ACP) y el análisis de correlación (Tabla 2.3) entre variables se observó que existía redundancia entre variables.

Tabla 2.3. Coeficientes de correlación y p- valor entre variables extraídas de los análisis de correlación

Variable 1	Variable 2	Pearson	
		n	P-valor
Isotermalidad	Estacionalidad de temperatura	-0.8101	<0,01
recipitación del mes más seco	Estacionalidad de precipitación	-0.8885	<0,01
Precipitación del mes más seco	Precipitación del trimestre más frío	0.9457	<0,01
	Precipitación del trimestre más seco	0.9867	<0,01
Precipitación del mes más húmedo	Precipitación del trimestre más húmedo	0.9871	<0,01
Precipitación del mes más húmedo	Precipitación del trimestre más cálido	0.9712	<0,01

La Figura 2.4 presenta el dendrograma con clasificación Jerarquizada realizado con 16 variables climáticas, donde se denotan la cantidad de grupos climáticos que son posibles de formar según distancia Euclídea. Se observa que a una distancia de 6 se diferenciaron 5 grupos; a una distancia de 6,58 se forman 4 grupos y 3 grupos a una distancia de 7.

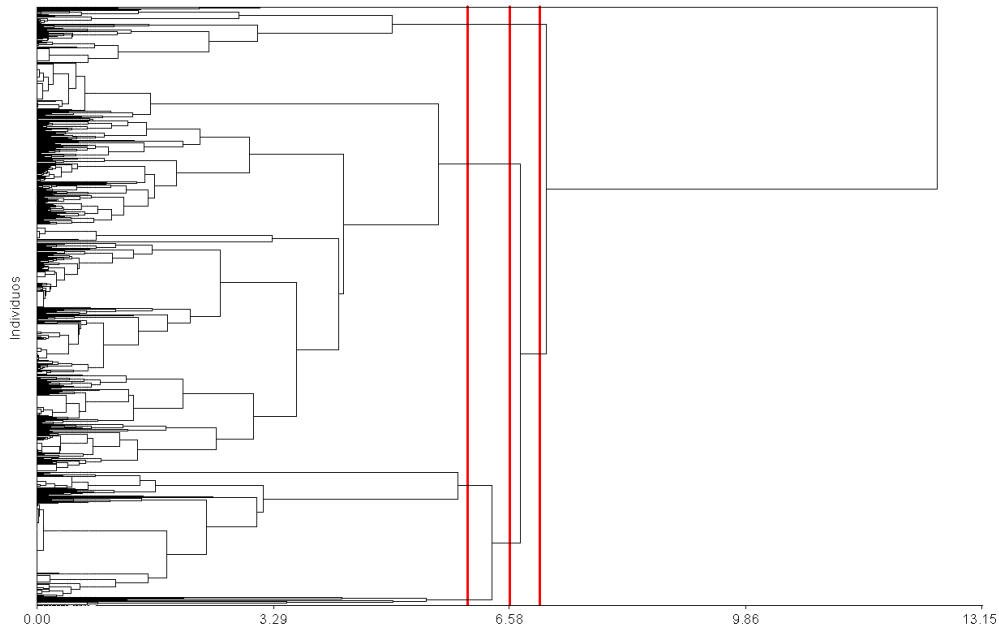


Figura 2.4. Dendrograma obtenido con el método UPGMA, basado en la distancia Euclídea entre individuos representados por 16 variables climáticas con clasificación Jerarquizada. Correlación cofenética=0,857

El análisis de conglomerado no jerarquizado es informativo de la heterogeneidad dentro de los grupos en función del número de grupos generados (Figura 2.5).

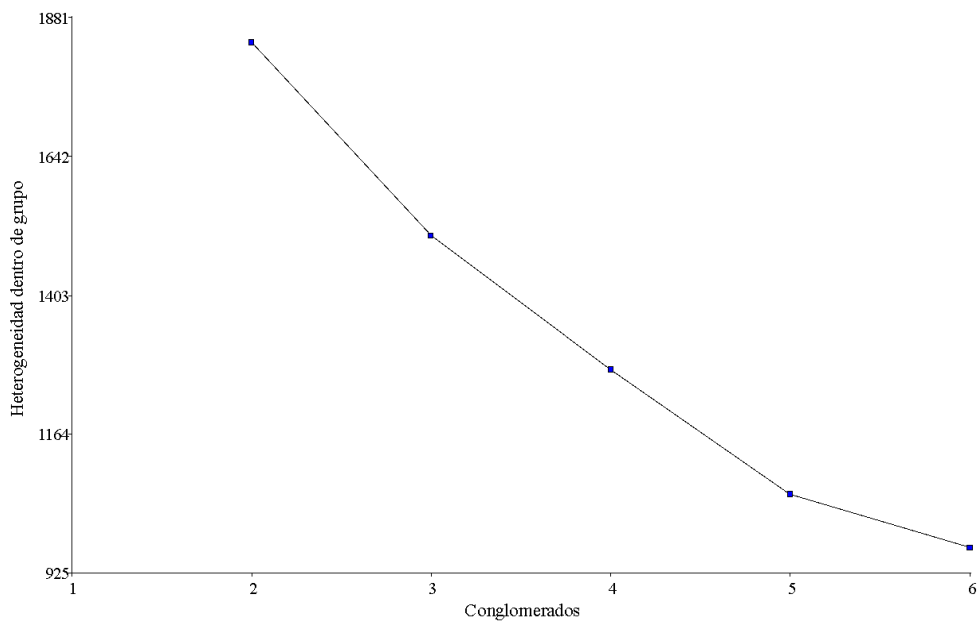


Figura 2.5. Heterogeneidad dentro del grupo según número de conglomerado formados

En el Bi-Plot, Figura 2.6a, resultado del ACP coloreado por grupos, demuestra la capacidad de las componentes para diferenciar los grupos y su grado de superposición. La componente principal 1 (CP1) explicó el 45 % de la variación total, mientras que la componente principal 2 (CP2) resume un 26,1 % de la variabilidad existente, sintetizando entre ambas CP el 71,1 % de la variación total.

En la Figura 2.6b, se presenta la dispersión de los cinco grupos generados en el ACP, idénticos colores a los utilizados en el Bi-Plot de la Figura 2.6a, en función de las variables de latitud y longitud, representando la distribución espacial de los grupos generados en el territorio argentino.

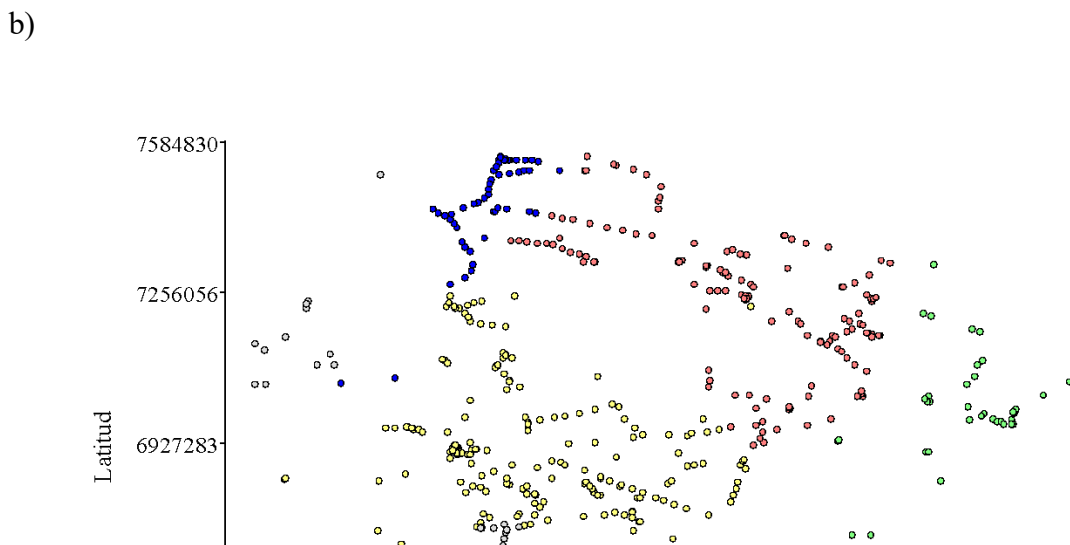
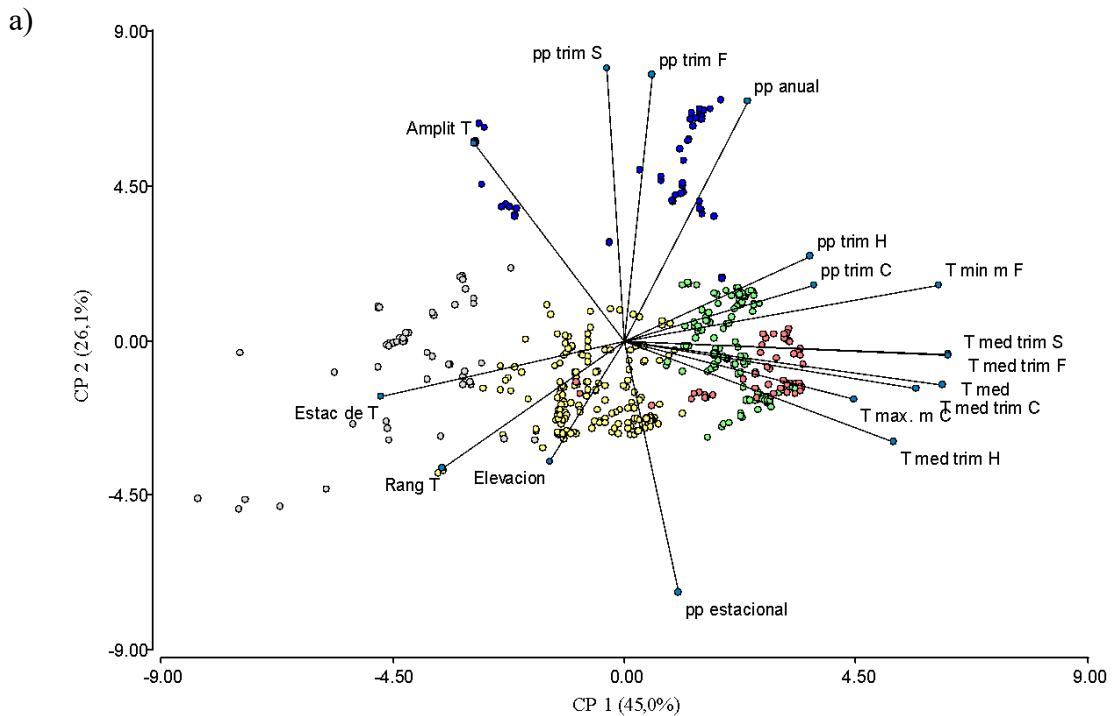


Figura 2.6. Análisis de los grupos: a) ordenamiento bidimensional de variables ambientales en dos ejes principales (CP1, CP2), b) dispersión de datos según latitud y longitud.

El análisis discriminante (ADL) para la conformación de 3, 4, 5 y 6 grupos señala que el mejor agrupamiento es el de 5 grupos (Figura 2.7) brindando la menor tasa de error aparente (1,12). Los dos ejes canónicos del ADL para 5 grupos explican el 76,3 % de la variación entre grupos, siendo la temperatura media la variable más importante para discriminar entre grupos, ya que tiene el valor absoluto más alto (3,86) para el eje canónico 1. Para el eje canónico 2, la variable más importante fue la precipitación estacional con un valor de 2,46.

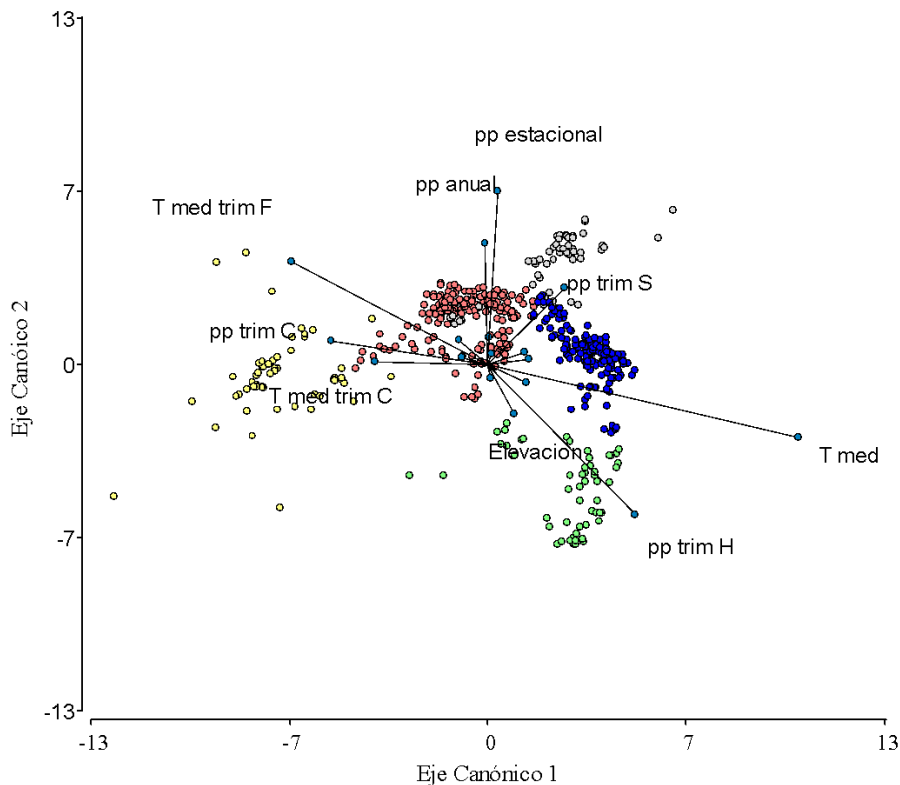


Figura 2.7. Agrupamientos conformados con las 17 variables: 16 climáticas y la altitud mediante análisis discriminante

En la figura 2.7 se observa que existe una asociación de los grupos con distintas variables, así los mayores valores se reflejan en el grupo amarillo en las variables: rango anual de temperatura, estacionalidad de temperatura; en el grupo verde en rango diurno medio, precipitación del trimestre más frío, precipitación del trimestre más seco y precipitación anual; en el grupo rojo en temperaturas medias del trimestre más frío, del trimestre más húmedo, y la media, como también la temperatura media del trimestre

más frío. El grupo azul por su parte se destaca por presentar los mayores valores en cuanto a las variables: precipitaciones del trimestre más húmedo, estacionales, y del trimestre más cálido, las temperaturas mínimas del mes más frío, medias del trimestre más seco y la elevación. Los menores valores en la mayoría de las variables los presentó el grupo gris para las variables: temperatura media del trimestre más húmedo, del trimestre más seco, del trimestre más cálido, del trimestre más frío y la temperatura media, temperatura máxima del mes más cálido, temperatura mínima del mes más frío, y precipitación del trimestre más cálido.

Las 5 zonas climáticas homogéneas de distribución de *P. alba* ($p < 0,05$) identificadas para Argentina se observan en la Figura 2.8.a Se observa un grupo en la zona norte y centro de la distribución marcado en la figura con color rojo, en las provincias de Salta, Chaco, Formosa, parte norte de Santa Fe y Santiago del Estero; un grupo en la zona noroeste de la distribución, en color azul, en las provincias de Salta y Tucumán; otro grupo en la región centro, de amarillo (sur de la provincia de Salta, Santiago del Estero y oeste de Santa Fe); un grupo de la región este (en las provincias de Santa Fe, Entre Ríos, este de Chaco y este de Formosa); y un grupo en la zona suroeste, marcado con color gris en la figura, en las provincias de Córdoba, Tucumán y Salta.

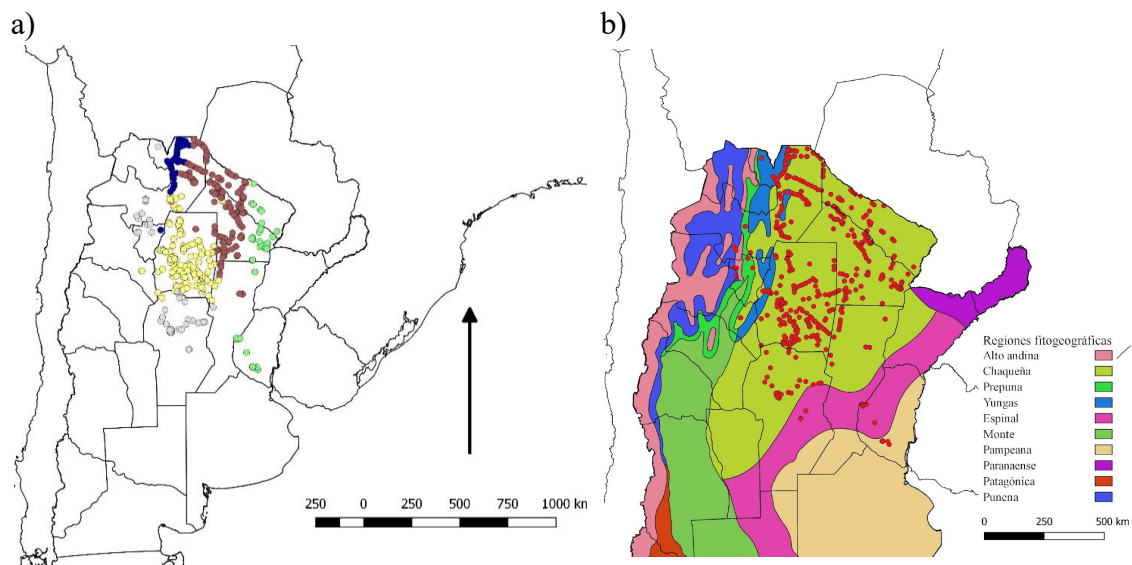


Figura 2.8. a) Zonas climáticas homogéneas de distribución de *P. alba* en la Argentina b) puntos de presencia de la especie en relacionadas a las regiones fitogeográficas de pertenencia

Dado que las colecciones *ex situ* tienen como objetivo cubrir la máxima variación genética y el rango de adaptación ambiental de las especies objetivo, es importante conocer la representatividad que las colecciones tienen del territorio. Tal como lo menciona Parra-Quijano (Parra-Quijano *et al.*, 2008, 2012b) la representatividad de las colecciones *ex situ* pueden medirse en términos genéticos y ecogeográficos. Para alcanzar la representatividad genética de las poblaciones distribuidas en el territorio, los estudios genéticos resultan demasiado costoso. Por otro lado, existe una estrecha relación entre las condiciones ecogeográficas y los patrones genéticos (Allard, 1988; Byers, 2005; Green y Hart, 1999), por lo cual, se puede utilizar la representatividad ecogeográfica como medida indirecta de la representatividad genética (Parra-Quijano *et al.*, 2012c).

Cuanto mayor representatividad ecogeográfica se alcance, mayor será la cantidad de variación genética capturada (Parra-Quijano *et al.*, 2012c). En este sentido este capítulo realiza un aporte completando con datos de presencia una zona poco explorada previamente. Sin embargo, tal como lo muestra la Figura 2.8.a, los puntos del muestreo referenciados en color gris al sur de la distribución pertenecen a una zona climática que ya tenía representantes ubicados en el extremo oeste, en las provincias de Tucumán, Salta y Córdoba. La Figura 2.8.b también muestra que la zona de la provincia de Santa Fe que corresponde a la región fitogeográfica del Espinal presenta pocos datos de presencia de *P. alba* y podría ser una zona con poca o nula representatividad ecogeográfica. Esta zona fue muestreada en el marco de la presente tesis sin encontrar poblaciones de bosque nativo con presencia de *P. alba* que cumplan con las condiciones establecidas (población compuesta por 10 árboles separados 100 m entre sí). El resto de las zonas de distribución de la especie presenta datos de presencia y representatividad ecogeográfica.

Por otro lado tal como lo plantea Mackay *et al.* (2004) y Parra-Quijano *et al.*, (2012c) la zonificación ecogeográfica resulta un enfoque útil para: 1- examinar colecciones de germoplasma e identificar conjuntos de accesiones con una alta probabilidad de contener rasgos objetivos específicos basados en la información ecogeográfica de los sitios donde se recolectaron las poblaciones, 2- Puede ayudar a revelar el rango adaptativo de las especies conservadas y 3- Sirve para detectar los factores ambientales más importantes en términos de adaptación. Es decir, que la

zonificación elaborada presenta una utilidad mayor, en el análisis y determinación del posible movimiento del material genético de *P. alba* en el territorio Argentino, fijando límites que permitan asegurar el éxito de los proyectos de reforestación y forestación a través de la selección del material reproductivo forestal apropiado.

Ajuste del modelo de nicho actual de *P. alba*

Conformación de la base de datos de presencia de P. alba. La base de datos final con la que se realizó el ajuste del modelo de nicho quedó conformada por un total de 1.172 datos de presencia de *P. alba* para los países de Bolivia, Paraguay y Argentina. La Figura 2.9 localización de los puntos compilados.

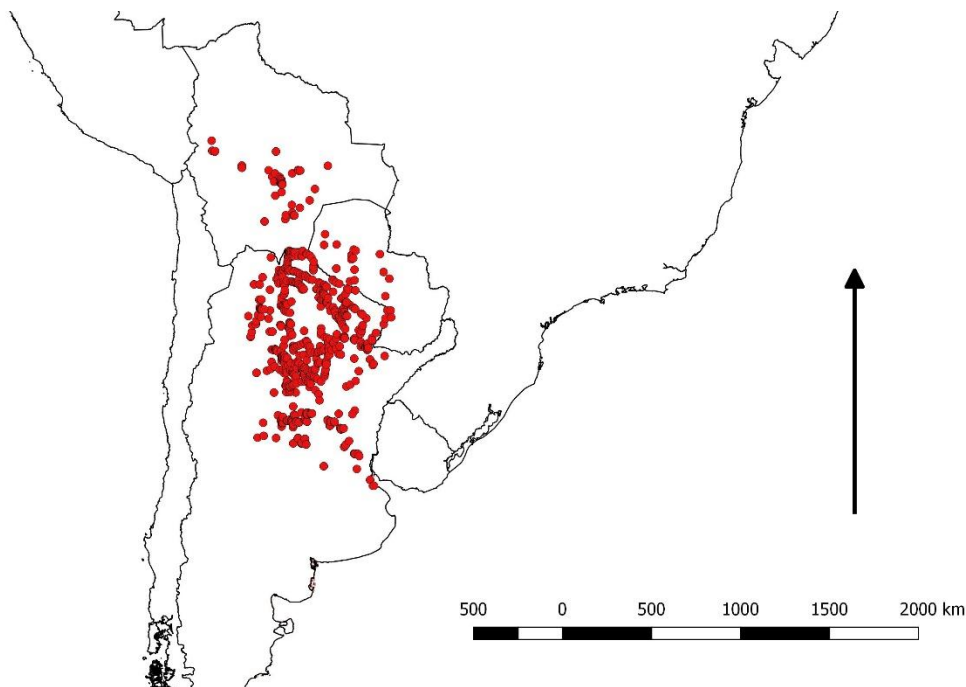


Figura 2.9. Distribución de *P. alba* según los 1.172 puntos de presencia de la especie.

Selección de las variables que definen la distribución. Teniendo en cuenta los menores valores de colinealidad (índice VIF menor a 10) se seleccionaron 6 variables, de las 19 variables bioclimáticas utilizadas para modelar la distribución de *P. alba*: BIO2 (rango diurno medio), BIO3 (isotermalidad), BIO8 (temperatura media del trimestre más húmedo), BIO14 (precipitación del mes más seco), BIO15 (estacionalidad de precipitación) y BIO18 (precipitación del trimestre más cálido). Estas 6 variables fueron las utilizadas tanto en el programa R (R Core Team, 2019) para las evaluaciones de los diferentes coeficientes de regulación y “features”, como en el programa Maxent

(Phillips *et al.*, 2017b) para el modelo final. Es de destacar que las variables BIO15 (estacionalidad de la precipitación), BIO2 (rango diurno medio), BIO8 (temperatura media del trimestre más húmedo), y BIO18 (precipitación del trimestre más cálido) fueron variables de peso para separar los grupos climáticos homogéneos de presencia de *P. alba*.

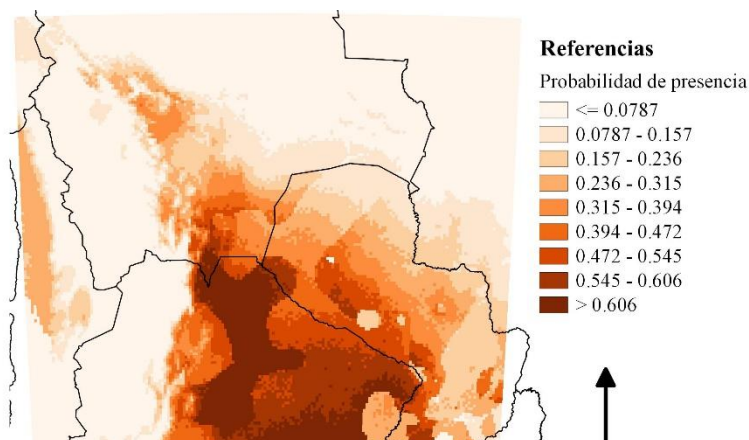
Ajuste del modelo. Los nueve mejores modelos de acuerdo a la métrica AUC se muestran en la Tabla 2.4. Todos clasificados por Araujo y Guisan (2006) como modelos con buena precisión por poseer valores de AUC entre 0,8 y 0,9.

Tabla 2.4. Valores de AUC (*area under the curve*) mayores a 0,850 obtenidos para los diferentes modelos

Features	Coef. de regulación	AUC
LQ	0,5	0,852
LQHP	2,5	0,850
LQHP	3,0	0,851
H	3,5	0,850
LQH	3,5	0,850
LQHP	3,5	0,851
H	4,0	0,850
LQH	4,0	0,850
LQHP	4,0	0,851

Referencias: “Features”: LQ (*linear y quadratic*); H (*hinge*); LQH (*linear, quadratic, y hinge*); LQHP (*linear, quadratic, hinge y product*).

El modelo que presentó mayor valor de AUC (0,852) fue el realizado con features *linear y quadratic* con un coeficiente de regulación de 0,5. En la Figura 2.10 se muestra la probabilidad de presencia de *P. alba* realizada con el modelo elegido en el programa MaxEnt (Phillips *et al.*, 2017b).



El nicho actual obtenido en la presente tesis difiere levemente con el encontrado por Venier *et al.* (2013) y Verga *et al.* (2013) probablemente debido a que se utilizaron diferentes datos de presencia, algoritmos de modelación y capas climáticas. El modelo de nicho actual elaborado presenta datos de probabilidad hasta un nivel de probabilidad mayor a 60 %. Verga *et al.* (2013) realizó el modelado de tres ecotipos de *P. alba* (“Santiagueño”, “Chaqueño Norte” y “Chaqueño Sur”), utilizó el algoritmo BIOCLIM, hoy en día no muy utilizado ya que trata cada eje climático de forma independiente, lo que lleva en algunos casos a predicciones ecológicamente erróneas (Booth, 1990; Li y Wang, 2013). Muestras de las posibles inconsistencias que ocasiona BIOCLIM pueden encontrarse en el trabajo de Carpenter *et al.*, (1993). Distinto y más novedoso método fue utilizado por Venier *et al.* (2013) en el modelado de los tres ecotipos de *P. alba*, quien utilizó el algoritmo MaxEnt. Sin detallar la metodología utilizada en el ajuste y validación del modelo. Venier *et al.* (2013) realiza un análisis de la variación geográfica del nicho en una proyección a un escenario climático futuro (año 2050), por lo que el trabajo será retomado en el Capítulo 5 de la presente tesis.

Por otro lado, si bien resulta interesante el análisis por ecotipo de la especie que realizan los autores, existe un amplio rango de la distribución de la especie en Argentina que no fue analizado. Particularmente Verga *et al.* (2013), que si bien muestran los puntos de presencia utilizados para realizar el modelo, no presenta datos de presencia de la especie en las provincias de Tucumán y Córdoba, y presentan solo uno en la provincia de Santa Fé y dos en Entre Ríos.

La selección de las variables ambientales explicativas de la distribución es un aspecto determinante en el modelo final. Al respecto Verga *et al.* (2013) y Venier *et al.* (2013) utilizaron las 19 variables bioclimáticas disponibles en Worldclim en sus diferentes versiones (<https://www.worldclim.org/>), sin realizar ninguna preselección. Disminuir la dimensionalidad de las variables explicativas eliminando variables que puedan resultar redundantes y priorizando las variables con mayor capacidad predictiva simplifica y potencia los algoritmos de predicción (Merow *et al.*, 2013). En el ajuste del presente capítulo se realizó un recorte de las 19 variables bioclimáticas acotado a la zona de distribución de la especie y se seleccionaron para modelar las 6 variables menos

correlacionadas. Acotar el dominio espacial de las variables bioclimáticas es una práctica recomendada para modelar con datos de solo presencia (Elith *et al.*, 2011).

Analizando las contribuciones relativas a la variabilidad total del modelo, la variable de mayor importancia en la distribución fue la precipitación del trimestre más cálido (BIO18) que contribuyó en un 28,6 % del total, seguida de la precipitación del mes más seco (BIO14) que aporta en un 28,2 % a la variabilidad total. En la Figura 2.11 se observa la participación que tuvieron de las variables climáticas a la variabilidad total.

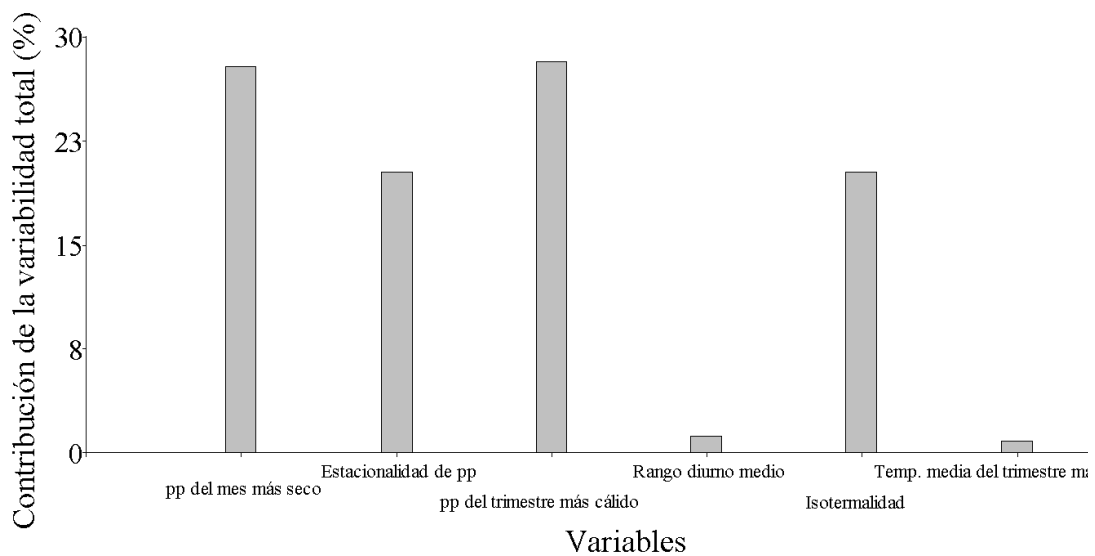


Figura 2.11. Contribución de las variables climáticas a la variabilidad total del modelo.

La Figura 2.12, resultados de la prueba de *Jackknife*, muestra a la isotermalidad (BIO3) como variable con más peso cuando se usa de forma aislada (coeficiente de 0,49), lo que significa que es la que tiene la información más útil por sí misma. Muestra también, a la isotermalidad como la variable que más reduce el coeficiente global parcial en su ausencia, por lo que es la variable que posee la mayor cantidad de información que no está presente en otras variables. Resultados similares fueron encontrados para *Prosopis hassleri* por Kees *et al.* (2013) quienes resaltan que las variables que actúan como limitantes en el área de dispersión de la especie, están relacionadas con la temperatura.

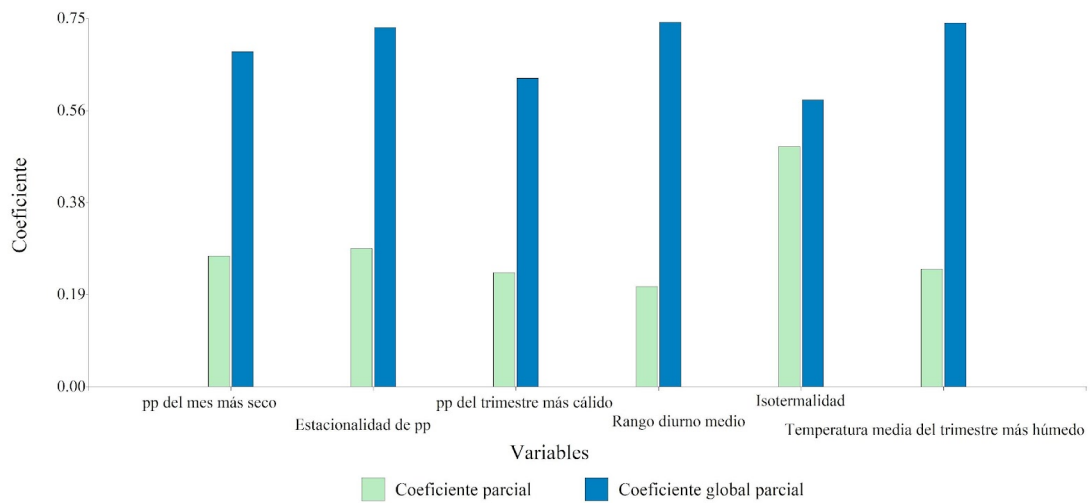
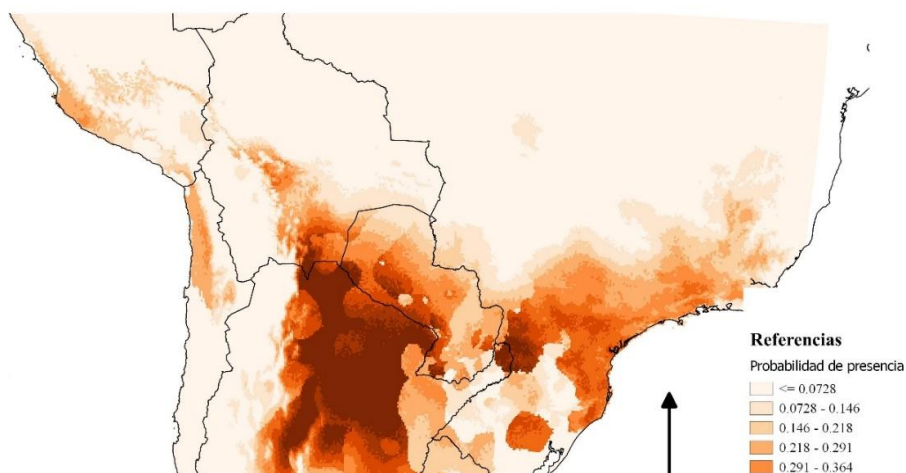


Figura 2.12. Coeficientes individuales y globales en relación a las variables BIO usadas en el modelado de nicho de *P. alba*. Mayores valores de coeficiente parcial, implican mayor contribución de la variable al modelo. Menores valores de coeficiente global parcial implican menores desempeños del modelo en ausencia de la variable.

La proyección del modelo actual a una zona geográfica mayor (-45 a -10 grados de Latitud y -85 a -40 grados de Longitud) a la utilizada para calibrar, se muestra en la Figura 2.13. Puede observarse que si bien la zona oeste de Brasil, que limita con Misiones, no presenta ejemplares de *P. alba* en la actualidad, sus condiciones climáticas son óptimas para la presencia de la especie, encontrando valores de probabilidad que llegan a 0,58. Esta diferencia encontrada puede deberse a que si bien las zonas presenta las condiciones climáticas, existen otras variables como tipo de suelo o condiciones edáficas que no fueron analizadas en la definición de nicho, en la que pueden encontrarse diferencias o competencias que no permitan la presencia de la especie (Reynoso *et al.*, 2018).



CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos dan respuesta a los interrogantes planteados ¿Cómo es la distribución actual de la especie?, ¿a qué variables ambientales responde?, por lo que se concluye que:

El relevamiento de la región fitogeográfica del Espinal contribuye a definir la distribución espacial actual de *Prosopis alba* para Argentina.

Prosopis alba tiene una amplia distribución en América del Sur, encontrándose poblaciones desde los 16° 4' 48'' grados de latitud N a 34° 46' 48'' grados de latitud sur. En cuanto a su distribución en longitud la más occidental es 68° 2' 60'' y la más oriental es 57° 37' 12''. Abarca los países de Bolivia, Paraguay y Argentina. En Argentina ocupa las provincias de Buenos Aires, Chaco, Córdoba, Corrientes, Entre Ríos, Formosa, Jujuy, Salta, Santiago del Estero, Santa Fe, San Luis, Tucumán, correspondientes a las regiones fitogeográficas de Chaco semiárido y subhúmedo, el Espinal, Pampa, Selva de las Yungas, Puna, Pre-puna y Altos Andes oriental.

La heterogeneidad ambiental de la distribución espacial de *P. alba* en la Argentina se puede explicar a partir de 5 zonas climáticas homogéneas.

El reconocimiento de las variables climáticas y su modelado definidos por la presencia de *P. alba* infieren el nicho de distribución actual de la especie, estando la distribución de *P. alba* principalmente asociada a las variables bioclimáticas isothermalidad (BIO3), precipitación del trimestre más cálido (BIO18) y precipitación del mes más seco (BIO14), pero también influyen en su distribución las variables rango diario medio (BIO2), temperatura media del trimestre más húmedo (BIO8), y estacionalidad de precipitación (BIO15).

BIBLIOGRAFÍA

- Allard, R.W. (1988) Genetic changes associated with the evolution of adaptedness in cultivated plants and their wild progenitors. *Journal of Heredity*, **79**, 225-238.
- Anderson, R.P. (2015) El modelado de nichos y distribuciones: No es simplemente “clic, clic, clic”. *Biogeografía*, **8**, 4-27.
- Araujo, M.B. y Guisan, A. (2006) Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of biogeography*, **33**, 1677-1688.
- Besega, C., Pometti, C.L., Ewens, M., Saidman, B.O. y Vilardi, J.C. (2012) Strategies for conservation for disturbed *Prosopis alba* (Leguminosae, Mimosoidae) forests based on mating system and pollen dispersal parameters. *Tree Genetics and Genomes*, **8**, 277-288.
- Booth, T.H. (1990) A climatic analysis method for expert systems assisting tree species introductions. *Agroforestry systems*, **10**, 33-45.
- Booth, T.H., Nix, H.A., Busby, J.R. y Hutchinson, M.F. (2014) Bioclim: The first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MaxEnt studies. *Diversity and Distributions*, **20**, 1-9.
- Burkart, A. (1976) A monograph of the genus *Prosopis* (Leguminosae subfam. Mimosoideae). *Journal of the Arnold Arboretum*, 450-525.
- Byers, D.L. (2005) Evolution in heterogeneous environments and the potential of maintenance of genetic variation in traits of adaptive significance. *Genetica*, **123**, 107.
- Carpenter, G., Gillison, A.N. y Winter, J. (1993) DOMAIN: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity and Conservation*, **2**, 667-680.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C.W. (2018) InfoStat version 2018. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Elith, J., H. Graham, C., P. Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A. (2006) Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, **29**, 129-151.
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E. y Yates, C.J. (2011) A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions*, **17**, 43-57.
- Ferreira, L.I. (2000) Estudio de la variabilidad y la diferenciación genética por medio de técnicas de Isoenzimas y RAPD en poblaciones naturales de especies e híbridos del Género *Prosopis* (Leguminosae).
- Fick, S.E. y Hijmans, R.J. (2017) WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, **37**, 4302-4315.
- Franklin, J., Davis, F.W., Ikegami, M., Syphard, A.D., Flint, L.E., Flint, A.L. (2013) Modeling plant species distributions under future climates: how fine scale do climate projections need to be? *Global change biology*, **19**, 473-483.

- Galera, M.F. (2000) *Los algarrobos: las especies del género Prosopis (algarrobos) de América Latina con especial énfasis en aquellas de interés económico*. Gráficas, Graziani.
- G.B.I.F. (2019) GBIF Home Page.
- Greene, S.L. y Hart, T.C. (1999) Implementing geographic analysis in germplasm conservation. *Linking genetic resources and geography: emerging strategies for conserving and using crop biodiversity*, **27**, 25-38.
- Guisan, A. y Thuiller, W. (2005) Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology letters*, **8**, 993-1009.
- Guisan, A., Petitpierre, B., Broennimann, O., Daehler, C. y Kueffer, C. (2014) Unifying niche shift studies: Insights from biological invasions. *Trends in Ecology and Evolution*, **29**, 260-269.
- Hijmans, R.J., Guarino, L., Cruz, M. y Rojas, E. (2001) Computer tools for spatial analysis of plant genetic resources data: 1. DIVA-GIS. *Plant Genetic Resources Newsletter*, 15-19.
- Hijmans, R.J., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., Jarvis, A. y Richardson, K. (2005a) WorldClim, version 1.3. *University of California, Berkeley*.
- Hijmans, R.J., Guarino, L., Jarvis, A., O'brien, R., Mathur, P., Bussink, C. (2005b) Diva-GIS version 5.2. *Published on the Internet <http://diva-gis.org>*.
- Ibarra-Montoya, J.L., Rangel-Peraza, G., González-Farías, F.A., De Anda, J., Martínez-Meyer, E. y Macías-Cuellar, H. (2012) Uso del modelado de nicho ecológico como una herramienta para predecir la distribución potencial de *Microcystis sp* (cianobacteria) en la Presa Hidroeléctrica de Aguamilpa, Nayarit, México. *Revista Ambiente & Agua*, **7**, 218-234.
- Joseau, M.J. (2006) *Caracterización morfológica y genética de poblaciones del género Prosopis del Chaco semiárido del norte de Córdoba y sur de Santiago del Estero. Tesis para optar al grado de Doctora en Ciencias Agropecuarias*. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba.
- Kees, S.M., Gómez, C.A., Vera, M.A., Cardozo, F., López, D., Muttoni, F. (2013) Predicción del área de distribución natural de *Prosopis hassleri* en la provincia de Formosa–Argentina.
- Li, X. y Wang, Y. (2013) Applying various algorithms for species distribution modelling. *Integrative Zoology*, **8**, 124-135.
- Mackay, M.C., Street, K., Mitrofanova, O., Zuev, E., Strelchenko, P. y Pertziger, F. (2004) Focused identification of germplasm strategy–FIGS. *Proceedings 11th Wheat Breeding Assembly*, 20-24.
- Merow, C., Smith, M.J. y Silander, J.A. (2013) A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, **36**, 1058-1069.
- Muscarella, R., Galante, P.J., Soley-Guardia, M., Boria, R.A., Kass, J.M., Uriarte, M., (2014) ENM eval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models.

- Methods in Ecology and Evolution*, **5**, 1198-1205.
- Naimi, B. (2015) usdm: Uncertainty analysis for species distribution models. *R package version*, **1**, 1-12.
- Parra-Quijano, M., Draper, D., Torres, E. y Iriondo, J.M. (2008) Ecogeographical representativeness in crop wild relative ex situ collections. *Crop wild relative conservation and use. CAB International*, 249-273.
- Parra-Quijano, M., Iriondo, J.M. y Torres, E. (2012a) Ecogeographical land characterization maps as a tool for assessing plant adaptation and their implications in agrobiodiversity studies. *Genetic Resources and Crop Evolution*, **59**, 205-217.
- Parra-Quijano, M., Iriondo, J.M. y Torres, E. (2012b) Improving representativeness of genebank collections through species distribution models, gap analysis and ecogeographical maps. *Biodiversity and Conservation*, **21**, 79-96.
- Parra-Quijano, M., Iriondo, J. M., y Torres, E. (2012c). Applications of ecogeography and geographic information systems in conservation and utilization of plant genetic resources. *Spanish Journal of Agricultural Research*, *10*(2), 419-429.
- Pebesma, E. y Bivand, R.S. (2005) S classes and methods for spatial data: the sp package. *R news*, **5**, 9-13.
- Peterson, A.T., Soberón, J., Pearson, R.G., Anderson, R.P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M. (2011) *Ecological niches and geographic distributions (MPB-49)*. Princeton University Press.
- Phillips, S. (2006) A brief tutorial on Maxent. AT&T Research.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., Dudík, M., Schapire, R.E. y Blair, M.E. (2017a) Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*, **40**, 887-893.
- Phillips, S.J., Dudík, M. y Schapire, R.E. (2017b) Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4. 1). *Biodiversity Informatics*.
- Quantum, G.I.S. (2016) Development Team (2016) Quantum Geographic Information System.
- R Core Team, R. (2019) R: A Language and Environment for Statistical Computing (ed RDC Team). R Foundation for Statistical Computing, 1, 409.
- Rehfeldt, G.E. (1979) Ecological adaptations in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* var. *glauca*) populations. *Heredity*, **43**, 383-397.
- Rehfeldt, G.E. (1990) Genetic differentiation among populations of *Pinus ponderosa* from the upper Colorado River Basin. *Botanical Gazette*, **151**, 125-137.
- Rehfeldt, G.E. (1991) A model of genetic variation for *Pinus ponderosa* in the Inland Northwest (USA): applications in gene resource management. *Canadian Journal of Forest Research*, **21**, 1491-1500.
- Reynoso Santos, R., Pérez Hernández, M.J., López Báez, W., Hernández Ramos, J., Muñoz Flores, H.J., Uicab, C. (2018) El nicho ecológico como herramienta para predecir áreas potenciales de dos especies de pino. *Revista mexicana de ciencias forestales*, **9**, 47-68.

- Roig, F.A. (1993) Informe nacional para la selección de germoplasma en especies de *Prosopis* de la República Argentina. *Contribuciones mendocinas a la Quinta Reunión Regional para América Latina y el Caribe de la Red de Forestación del CIID*, 1-37.
- Romo, H., Sanabria, P. y García-Barros, E. (2013) Predicción de los impactos del cambio climático en la distribución sobre las especies de lepidoptera. el caso del género *Boloria moore*, 1900 en la península Ibérica (Lepidoptera: Nymphalidae). *SHILAP Revista de lepidopterología*, **41**, 267-286.
- SPECIES, L. (2017) Disponible em:< <http://www.splink.org.br/index?lang=pt/>>. Acceso en Agosto de 2020, **28**.
- TROPICOS, M. (2018) Tropicos.org.
- Varela, S., Lobo, J.M. y Hortal, J. (2011) Using species distribution models in paleobiogeography: a matter of data, predictors and concepts. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **310**, 451-463.
- Varela, S., Mateo, R.G., García-Valdés, R. y Fernández-González, F. (2014) Macroecología y ecoinformática: sesgos, errores y predicciones en el modelado de distribuciones. *Revista Ecosistemas*, **23**, 46-53.
- Venier, M.P., Cosacov Martinez, A., López Lauenstein, D., Vega, C. y Verga, A. (2013) Impacto del cambio climático sobre la distribución de *Prosopis Hassleri* y *P. alba* en la región chaqueña.
- Verga, A. (2002) Mapa Album. Mapa interactivo de la distribución de *Prosopis flexuosa* y *Chilensis*, disponible en CD.
- Verga, A., López, C., Navall, M., Joseau, J., Gómez, C., Royo, O. (2013) Caracterización morfológica, distribución geográfica y estimación de nichos ecológicos de algarrobos (*Prosopis sp.*) en las regiones fitogeográficas Chaqueña y Espinal norte de Argentina.
- Verzino, G., Carranza, C., Ledesma, M., Joseau, J. y Di Rienzo, J. (2003) Adaptive genetic variation of *Prosopis chilensis* (Mol) Stuntz: Preliminary results from one test-site. *Forest ecology and management*, **175**, 119-129.
- Verzino, E.G. y Joseau, M.J. (2005) El Banco nacional de germoplasma de *Prosopis*: conservación de recursos forestales nativos en Argentina.
- Verzino, G., Joseau, J., Dorado, M., Gellert, E., Rodríguez Reartes, S. y Nóbile, R. (2005) Impacto de los incendios sobre la diversidad vegetal, Sierras de Córdoba, Argentina. *Ecología Aplicada*, **4**, 25-34.
- Verzino, G., Frassoni, J., Joseau, M., Clausen, G., y Navarro, C. (2019). Conservación *ex situ*, *circa situ* e *in situ* realizada por el Banco Nacional de Germoplasma de *Prosopis*, Córdoba, Argentina. *Revista Nexo (NA-V7NI-9)*.
- Villagra, P. E., Cony, M. A., Mantován, N. G., Rossi, B. E., González Loyarte, M. M., Villalba, R., y Marone, L. (2004). Ecología y manejo de los algarrobales de la Provincia Fitogeográfica del Monte. *Ecología y manejo de bosques nativos de Argentina*, 2-32.
- Zuloaga F.O., Morrone O y Belgrano M. J. 2009. Catálogo de las Plantas Vasculares del

Conosur. Monographs in Systematic Botany Missouri Botanical Garden.

Zuloaga, F.O. y Belgrano, M.J. (2015) The Catalogue of Vascular Plants of the Southern Cone and the Flora of Argentina: their contribution to the World Flora. *Rodriguésia*, **66**, 989-1024.

CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y EDÁFICA DE LAS POBLACIONES DE CRECIMIENTO ESPONTÁNEO DE *P. alba* EN LA REGIÓN FITOGEOGRÁFICA DEL ESPINAL

INTRODUCCIÓN

El género *Prosopis* es un complejo sistema de especies taxonómicas entrelazadas entre sí (Fontana *et al.*, 2018). Sobre la base de características florales y diferencias vegetativas, Burkart (1976) definió los límites genéricos y dividió el género en cinco secciones: *Prosopis*, *Anonychium*, *Strombocarpa*, *Monilicarpa* y *Algarobia*. Además, identificó 5 series en la sección *Algarobia*: *Sericanthae*, *Ruscifoliae*, *Denudantes*, *Humiles*, *Pallidae* y *Chilenses*, separadas por el tipo de crecimiento vegetativo. Tres de las cinco secciones (*Strombocarpa*, *Monilicarpa* y *Algarobia*) presentes en el territorio argentino (Karlin y Palacios, 1988). Palacios y Bravo (1981) obtuvieron evidencia de hibridación natural basada en rasgos morfológicos entre varias especies de la sección *Algarobia*, a la cual pertenece *P. alba*. Estas especies, clasificadas por la sistemática (sistemática clásica en comparación a la taxonomía numérica), constituyen grupos de individuos “a priori” agrupados por características morfológicas comunes fácilmente distinguibles.

Verga *et al.* (2013) consideran que no son suficientes los métodos taxonómicos basados en la observación subjetiva de descriptores para diferenciar grupos de individuos que poseen cierta identidad morfológica y genética. Existen antecedentes del género (Verga, 1995; Verzino y Joseau, 2005; Joseau, 2006; Verga y Gregorius, 2007; Verga *et al.*, 2013) donde se ha demostrado que la caracterización morfológica, mediante taxonomía numérica, basada en rasgos de hoja y fruto, permite obtener grupos de individuos con características genéticas comunes en un grado de detalle mayor que el alcanzado mediante la sistemática

clásica. Verga *et al.* (2013) han observado que a determinado grado de diferenciación morfológica, obtenida por este método, se puede identificar grupos a nivel de ecotipos y sub-especies que se corresponden con distancias genéticas obtenidas con marcadores moleculares. En relación a las distancias morfológicas y genéticas de los grupos morfológicos en *Prosopis*, Joseau (2006) señala que la correlación entre las dos distancias es alta ($R^2 = 0,592$) lo que confirma la base genética de estos grupos obtenidas a través de un análisis numérico. Consecuentemente la taxonomía numérica resulta un método práctico y económico, confiable para tal fin.

Fontana *et al.*, 2018 sostiene en *P. alba* la presencia de alta diversidad genética y amplia distribución, elementos que ayudan a sustentar un programa de mejoramiento genético a largo plazo, pero sostienen que se requiere incrementar el conocimiento sobre la biología de la especie, dinámicas poblacionales y caracteres heredables. Brizuela *et al.* (2000) en estudios de variabilidad morfológica, sostienen que la variación morfológica observada en las procedencias analizadas no se debe a una respuesta a las condiciones ambientales sino a variación genética heredable. En relación a este aspecto, algunos autores (Verga *et al.*, 2009; Verga, 2014; Marcó *et al.*, 2016) han realizado estudios logrando definir morfotipos para el territorio argentino. Verga *et al.* (2009) diferenció los morfotipos “Santiagueño”, “Chaqueño Norte” y “Chaqueño Sur”, tomando como unidad taxonómica operativa al individuo, y donde cada individuo fue evaluado mediante la medición de 22 caracteres de hoja y fruto. Los grupos morfológicos fueron formados a través de un análisis de conglomerados determinando un valor umbral de distancia euclídea, considerando integrantes de cada grupo aquellos individuos que se diferencian entre sí por debajo de un umbral establecido (Distancia euclídea < 5). En 2014, Verga describe 5 morfotipos de *P. alba* (“Chaqueño Sur”, “Santiagueño”, “Bermejo”, “Salta Norte” y “Espinal”) con la medición de un menor número de caracteres (13) y sólo de hojas (longitud del pecíolo, número de pares de pinas, longitud de la pina, número de pares de foliólulos por pina, distancia entre foliólulos, longitud del foliólulo, ancho del foliólulo, relación longitud/ancho de foliólulo, área del foliólulo, relación entre la superficie del tercio superior del foliólulo respecto del área total del foliólulo, área total de la hoja, relación entre el largo de foliólulo y la distancia

entre foliólulos, y relación entre la distancia entre foliólulos y el ancho del foliólulo). Con los datos obtenidos realizó el análisis taxonómico mediante estadística multivariada siguiendo la metodología planteada por Verga *et al.* (2009).

Al respecto Marcó *et al.* (2016) describen los 5 morfotipos de Verga (2014) y los asocia a su ubicación geográfica. Así el morfotipo “Chaqueño” de hojas con numerosos pares de foliólulos y muy cercanos entre sí lo asocia al Río Bermejo; el morfotipo “Chaqueño Sur” similar al “chaqueño” pero de foliólulos más anchos y un poco más separados lo ubica al sur del “Chaqueño”; el “Salteño Norte” con foliólulos de mayor área que el “Chaqueño” y al “Chaqueño Sur” señalan que se extiende hacia Bolivia; el morfotipo “Santiagueño” de hojas con foliólulos apenas un poco menores pero más anchos que el “Salteño Norte” lo ubica al centro norte de la provincia de Santiago del Estero, mientras que el “Salta Centro” lo hace en una zona de convergencia de los morfotipos “Salteño”, “Santiagueño” y “Chaqueño”.

Verga *et al.* (2009) creó un individuo “virtual” con los valores promedios de todos los árboles medidos por morfotipo, que luego ingreso en un análisis multivariado, y al individuo más cercano en distancia euclídea lo identificaron y denominaron “árbol tipo” del morfotipo. De esa manera Verga *et al.* (2009) identifica “árboles tipos” de los morfotipos “Chaqueño Norte”, “Chaqueño Sur” y “Santiagueño”. En trabajos posteriores Verga (2014) y Marcó *et al.* (2016) describen valores de caracteres morfológicos y muestran hojas de “árboles tipo” para 5 morfotipos de *P. alba* (“Chaqueño Sur”, “Santiagueño”, “Bermejo”, “Salta Norte” y “Espinal”) obtenidos de igual manera. Estos árboles tipos son los que los autores utilizan en las comparaciones de los morfotipos (Marcó *et al.*, 2016).

Un factor importante a tener en cuenta que incide sobre el componente vegetal es el factor edáfico. Al respecto, en el área forestal, es muy común la utilización del término “sitio” que representa la influencia combinada de clima y suelo (Larguia, 1976), ambos en función de factores como los son la histología geológica, fisiografía, el macroclima, la pendiente, orientación y el desarrollo de la sucesión vegetal. La calidad de sitio planteado en este sentido hace referencia al

potencial de producción de un lugar y con un tipo de bosque en particular (Pérez *et al.*, 2010) es decir que se toma al sitio como un factor condicionante de la productividad forestal.

La calidad de sitio puede ser descripto de forma directa o indirecta (Pérez *et al.*, 2010). Los estándares para definir la calidad de sitio de forma directa contienen datos basados en rodales puros, de edad uniforme y con población normal, y dado que es muy difícil encontrar este tipo de comunidades se utilizan con mayor frecuencia los métodos indirectos. Existen tres métodos indirectos: índice de sitio, por vegetación o por componente ambiental (Pérez *et al.*, 2010), siendo el índice de sitio el más utilizado. Las variables empleadas para definir el índice de sitio son la edad del rodal y la altura promedio de los árboles dominantes y codominantes (Pérez *et al.*, 2010).

Algunos autores han enfocado sus estudios en evaluar las diferentes calidades de sitios forestales de *Prosopis alba* en plantaciones. Entre ellos encontramos a Pérez *et al.* (2010) quien definió 5 clases de calidad de sitio para plantaciones realizadas en la provincia de Formosa en función del incremento medio anual del diámetro y altura. Vicentini *et al.*, (2012) y Pérez (2014) realizaron una clasificación provisoria de 5 calidades de sitios, también, para la provincia de Formosa y relacionaron las características edáficas y silvícolas. Kees *et al.* (2016) ajustó una ecuación de índice de sitio basado en la evolución de la altura dominante en función de la edad para plantaciones en la Provincia del Chaco. Por otra parte, Kees *et al.* (2017) relacionó las características edáficas de plantaciones de *P. alba* en la provincia de Chaco con la altura dominante, donde encontraron que la altura dominante de los árboles fue mayor en suelos con textura ligera, y menor en suelos con mal drenaje, poco profundo y con relieve sub normal. Un año más tarde Kees *et al.* (2018) estimó la calidad de parcelas forestadas con *Prosopis alba* en Chaco a partir de curvas de índice de sitio y las categorizó en muy buena, buena, regular y mala.

Vicentini y Pérez (2010) y Kees *et al.* (2017) relacionaron las variables morfométricas mencionadas con variables edáficas como la textura del suelo. Vicentini y Pérez (2010) describen que *P. alba* crece bien en suelos franco arenosos o arenosos. Resultados similares a los encontrados por Vicentini y Pérez

son descriptos por Kees *et al.* (2017), quienes encontraron que la altura dominante fue mayor en suelos con textura ligera.

Sin embargo, conocer las características edáficas a través de mediciones directas en las zonas naturales de distribución de cada morfotipo de *P. alba* resulta necesario a fin de clasificar y seleccionar suelos semejantes, aptos para futuras forestaciones. Al respecto Gracia Senilliani, Bruno y Brassiolo (2020) analizaron las relaciones entre CE, Na, Ca+Mg y RAS y el índice de sitio para Santiago del Estero, no obstante ello, no se han encontrado investigaciones que analicen el componente edáfico de la distribución de *P. alba* en la región fitogeográfica del Espinal. Por otro lado, resulta interesante conocer la relación entre el componente edáfico y la morfología de las poblaciones, en este sentido, Verga *et al.* (2013) caracterizaron los órdenes de suelos para los grupos morfológicos de bosques naturales “Santiagueño” y “Chaqueño Norte” y Moreno Contreras *et al.* (2021) encontraron que la variabilidad morfológica encontrada en *Prosopis spp.* en México tiene una baja asociación con la ubicación geográfica, y recomiendan evaluar tanto el efecto de factores ambientales, y características del suelo sobre la diversidad morfológica, así como también recomiendan el empleo de técnicas moleculares que permitan caracterizar genéticamente las poblaciones.

El objetivo del presente capítulo consistió en caracterizar morfológica y edáficamente las poblaciones de crecimiento espontáneo de *P. alba* en la región fitogeográfica del Espinal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo de poblaciones espontáneas

Para este análisis, se muestrearon 22 sitios y se georreferenciaron 241 árboles en 6 colectas durante dos años consecutivos (2016 y 2017) en los meses de enero- febrero como se presentó en el Capítulo II (Tabla 2.2). La ubicación geográfica de los 22 sitios se observa en la Figura 2.2 del Capítulo II. Los árboles muestreados estaban separados más 100 metros uno de otros siguiendo las

especificaciones de Verzino *et al.* (2005) y Bessega *et al.* (2012) . La identificación de los árboles está comprendida por un número, del 1 al 22 según el sitio donde estaban ubicado, seguido de una letra de la A la Z que indica que individuo del sitio es, entonces el individuo 8A es el primer árbol recolectado del sitio 8. Al momento de la identificación se recolectaron muestras de hojas y frutos. Los materiales fueron incorporados a la colección del Banco Nacional de Germoplasma de *Prosopis* de la Facultad de Ciencias Agropecuarias – U.N.C.

Caracterización morfológica

Los frutos cosechados en la temporada 2016 y 2017 fueron secados a estufa, fotografiados (Figura 3.1a) y posteriormente llevados a *freezer* para su conservación hasta su utilización. Un total de 2280 hojas (ver composición en Capítulo II- Tabla 2.2) identificadas por sitio y árbol, que habían sido colectadas y herborizadas, fueron fotografiadas (Figura 3.1b) y medidas mediante el programa Hojas 3.4. (Verga, 2000), siguiendo el protocolo sugerido por Verga (2005), Joseau (2006) y Joseau *et al.* (2005, 2013).

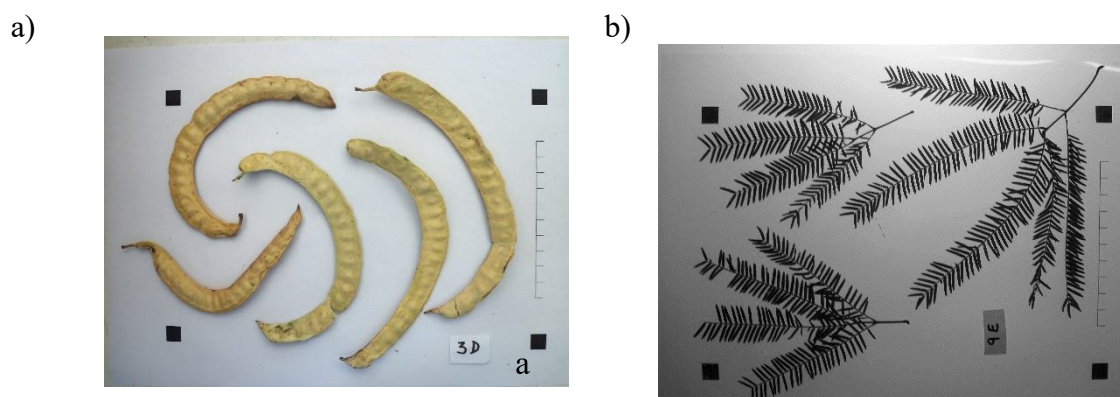


Figura 3.1. Material colectado de *P. alba*. Detalle de: a) frutos, b) hojas

Las variables morfológicas medidas con el programa Hojas fueron 11 (Figura 3.2): longitud del pecíolo (LPE), longitud de la pina (LPI), número de pares de foliólulos (NFOL), número de pares de pinas (NPI), largo del foliólulo (LFOL), ancho del foliólulo (AFOL), relación entre la superficie del tercio superior del foliólulo respecto del área total del foliólulo (APTOT), área foliar (ARFOL), distancia foliar (DIFOL), área total (ARTOT), relación longitud/ ancho del foliólulo (L_AFOL). La variable APTOT distingue foliólulos de extremos más

redondeadas con valores de la variable cercanos a uno, de foliólulos más puntudos con valores cercanos a cero.

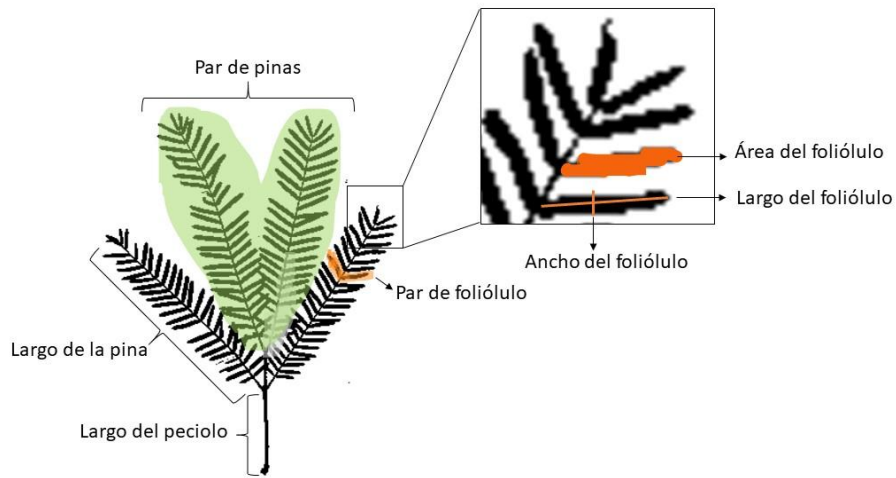


Figura 3.2. Variables medidas con el programa Hojas 3.4. para realizar la caracterización morfológica

Los resultados de estas mediciones sirvieron para la evaluación de la conformación de los grupos morfológicos utilizando diferentes herramientas de análisis multivariado, entre ellas, componentes principales y conglomerados jerarquizados utilizando el programa InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2018). La validación de los grupos morfológicos conformados se efectuó mediante el paquete NbClust (Charrad *et al.*, 2014), del programa R (R Core Team, 2019). La librería NbClust utiliza 30 índices para la clasificación, y el resultado obtenido por la regla de la mayoría indica cual es el mejor número de grupos a formar. Se realizó un análisis de la varianza multivariada (MANOVA) para confirmar la existencia de una distancia significativa entre los grupos y una comparación entre los grupos con una prueba t-Student para muestras apareadas. Se graficaron los grupos morfológicos en un mapa para conocer su ubicación y distribución geográfica.

Siguiendo la metodología planteada por Verga *et al.* (2009), Verga (2014) y Marcó *et al.* (2016) se creó un individuo “virtual” con los valores promedios de todos los árboles medidos por morfotipo, que luego fue ingresado al análisis

multivariado y el individuo más cercano en distancia euclídea fue identificado y denominado “árbol tipo” del morfotipo. Para explorar la ubicación de los morfotipos encontrados en relación a la variación previamente reportada se incorporó al análisis de conglomerado jerarquizado las medias morfológicas de los morfotipos obtenidos por Verga *et al.* (2009), Verga (2014) y Marcó *et al.* (2016) en los estudios de taxonomía numérica de hojas. Estos morfotipos (MFT) fueron: Bermejo (BE), Chaqueño Sur (CS), Espinal (ES), Santiagueño (SG), Salta Norte (SN). Utilizando el paquete “fmsb” (Nakazawa, 2018) del programa R (R Core Team, 2019) se realizó un gráfico de estrellas comparando los grupos morfológicos con las variables taxonómicas que los distinguen

Caracterización edáfica

Muestreo. Se recolectaron muestras de suelo pertenecientes a 16 de las poblaciones en estudio. En 4 sitios (1, 2, 5 y 8) no fue posible tomar las muestras debido a que el terreno se encontraba inundado o se presentaron dificultades técnicas que no permitieron la extracción de las muestras. Las muestras de suelos fueron compuestas en los sitios donde la superficie era homogénea, y se recolectaron dos o más muestras en sitios heterogéneos (Tabla 3.1). En todos los casos posibles se barrenó hasta el metro de profundidad, obteniendo una muestra por horizonte de suelo. La profundidad de los horizontes se tomó como variables (Prof) y fue expresada en centímetros.

Para la caracterización de los suelos se realizaron determinaciones de pH, conductividad eléctrica, color y textura de todos los horizontes muestreados, y de materia orgánica del horizonte superficial. Las determinaciones fueron realizadas siguiendo la metodología descrita por Sparks *et al.* (1996) en el Laboratorio de Calidad de Suelo (LECASUR) bajo la tutoría de la Dra. Hang Susana y el Dr. Julius Koritschoner.

Tabla 3.1. Sitios y cantidad de muestras de suelo recolectadas

Sitio	Lugar	Cantidad de muestras
3	Río I	2
4	Los Chañaritos	1
6	Parque San Martín	3
7	Colonia Nueva	2
9	Parque. de la Vida	3
10	Plaza de los Algarrobos	1
12	Frontera	1
13	Balnearia- Miramar	1
15	Esperanza	1
16	Villa María	2
17	San Jerónimo de los Sauces	1
18	Colonia de Machado	2
19	Villa del Rosario	1
20	Ballesteros	1
21	Belle Ville	1
22	Cintra	1

Propiedades químicas. Se determinaron tres propiedades químicas: pH, CE y materia orgánica.

pH (PH): Las mediciones de pH se realizaron con pH-metro marca HANNA instruments, modelo HI 2211.

CE (CE ms/cm): Los valores de Conductividad Eléctrica fueron obtenidos utilizando el conductímetro marca Mettler Toledo.

Materia Orgánica (MO %): La materia orgánica se determinó por el método de Walkley y Black (1934). Para la determinación se pesó entre 0,120 y 0,130 g de suelo, a lo que se agregó 1,5 ml de dicromato de potasio en el centro del tubo y 3 ml de ácido sulfúrico al borde del tubo. Se movió suavemente y llevó a conservadora por 30 minutos. Para cortar la reacción se utilizó 2,25 ml de agua. Por titulación por retorno con sulfato ferroso amónico (sal de mohr), se calculó el contenido de carbono orgánico total (COT).

$$\text{COT (mgC kg suelo)} = ((\text{volumen blanco} - \text{volumen muestra}) * \text{concentración sal de mohr} * 3) / (\text{masa de suelo} * 0,77)$$

Luego se convirtió el COT en materia orgánica del suelo (MOS)

MOS (% en fracción)= $COS/10/0,58$

Propiedades físicas. Se midieron dos propiedades físicas: color y textura.

Color: El color tanto húmedo como seco fue determinado utilizando las cartas Munsell (Charts, 1954). Los colores en seco de los horizontes por perfil de sitio fueron graficados a través de paquete “aqp” (Beaudette, Roudier y O’Geen, 2013) del programa R (R core Team, 2019).

Textura. Para la determinación de la textura se utilizó el método de la pipeta. Para ello, se pesaron 20 g de suelo y se colocaron en frascos de 400 ml y en los casos que el pH fue mayor a 8 se procedió a eliminar los carbonatos con el agregado de ácido acético en proporciones de 5 ml hasta la destrucción total del carbonato. Para la destrucción de la materia orgánica, los 20 g de suelo pesados por muestra se colocaron en una plancha a 170 °C. Se los trató con H₂O₂, agregando dosis de 10 ml por vez para producir una ebullición suave hasta que desaparezca el color oscuro, indicador de la materia orgánica. Finalizada esta etapa se pesaron nuevamente las muestras. A cada muestra se le agregaron 20 ml de Calgón y 100 ml de agua destilada agitando el material por 24 horas. El contenido se vertió en probetas de 1.000 ml, se agitó nuevamente y se realizaron dos extracciones de 10 ml cada una, una a los 48 segundos a una profundidad de 10 cm, y la otra a los 3,75 cm a las 3 horas. La profundidad y tiempo fue definida por la temperatura ambiental al momento de la prueba (20 °C). El material extraído se vertió en una cápsula de porcelana que fue llevada a estufa, y una vez seco se pesó, obteniendo las fracciones arcilla + limo de la primera extracción y arcilla de la segunda extracción. El material sobrante se colocó en un tamiz de 0,5 mm dónde se lavó hasta que el agua que escurría se mostró transparente. Se transvasó el material a una cápsula de porcelana, se secó en estufa, y posteriormente se pesó (fracción de arenas). Las variables obtenidas fueron: arcilla (% Arc), limo (% Limo) y arena (% Are), expresadas en porcentaje.

Las texturas del horizonte superficial de cada sitio fue graficada en un triángulo textural utilizando para esto el paquete “aqp” (Beaudette, Roudier y O’Geen, 2013) del programa R (R core Team, 2019). Utilizando igual paquete se realizó una caracterización colorimétrica de los perfiles por sitios, utilizando para

esto el color suelo seco. Con el fin de observar las tendencias espaciales de las variables se representaron en un mapa las variables del horizonte 1: MO (%), CE, pH y % de Arcilla, y se analizaron las correlaciones lineales entre las variables de suelo utilizando para esto la correlación de Pearson.

Asociación entre la caracterización morfológica y la caracterización edáfica

Se realizó un ANAVA entre los grupos morfológicos formados y las variables edáficas de cada grupo para conocer que variables edáficas permiten diferenciar los grupos morfológicos.

A través de diferentes análisis estadísticos realizados con el programa estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2018), se evaluó si existía una asociación entre las características del componente edáfico y los grupos morfológicos formados para los 16 sitios que presentaron muestras de hojas y suelo, así como entre las variables morfológicas y edáficas por origen muestreado. Se utilizó Análisis de Componentes Principales (ACP), Procrustes generalizado y Partial Least Squares (PLS), todos análisis estadísticos multivariados. El ACP se realizó entre variables morfológicas y edáficas por sitio, analizando las asociaciones entre las variables; el análisis permitió definir variables correlacionadas y facilitar la interpretación de las relaciones entre las variables edáficas y caracteres de hojas. El análisis de Procrustes generalizado se realizó por grupo de variables buscando definir la proporción de consenso entre los grupos de variables, estableciendo como grupo 1 a las variables edáficas y como grupo 2 a las variables de hojas. El PLS busca explicar un grupo de variables en función de otras y se realizó utilizando a las variables edáficas como variables predictoras, y a las variables morfológicas como variables respuesta. Además se realizó un análisis de correlación lineal entre las variables edáficas y morfológicas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización morfológica

En la Figura 3.3 se observa el resultados gráfico del análisis realizado sobre las poblaciones muestreadas. La misma representa un análisis de conglomerado en el cual se aprecia la formación de dos grupos morfológicos.

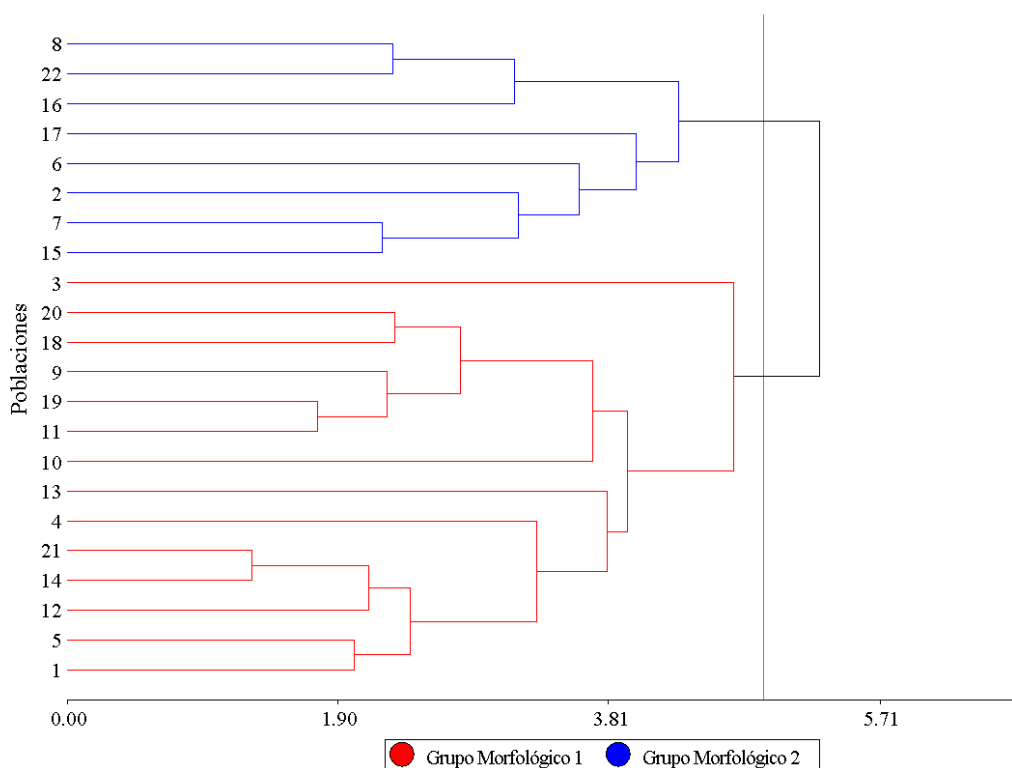


Figura 3.3. Dendrograma obtenido con el método UPGMA de un análisis de conglomerado Jerarquizado realizado con las mediciones de 11 caracteres morfológicos de hojas de los 22 sitios muestreados. Correlación cofenética 0,66. Distancia Euclídea de corte: 4,9.

A diferencia de lo realizado por Verga *et al.* (2009) quien utilizó como unidad taxonómica operativa al individuo, en el presente análisis se utilizó a la población, caracterizada por medio de mediciones de 11 caracteres de hojas de todos sus árboles (media poblacional realizada a partir de las medias de cada árbol). Los grupos morfológicos fueron definidos utilizando el análisis de conglomerados con estandarización previa de los datos (igual metodología que Verga *et al.*, 2009). Verga obtuvo una matriz de distancias euclídeas y consideró integrante de cada grupo aquellos individuos que se diferenciaban entre sí por debajo de un umbral de distancia euclídea establecido (Distancia euclídea < 5), similar a lo encontrado en este trabajo entre ambos grupos.

Por otro lado, Verga *et al.* (2009, 2013) analizaron la conveniencia del agrupamiento mediante el método de análisis discriminante, mientras que en el presente trabajo, la validación de los grupos morfológicos conformados se efectuó mediante el paquete NbClust (Charrad *et al.*, 2014) del programa R (R Core Team, 2019).

Los índices de validación para el número de grupos indicaron, según la regla de la mayoría, la existencia de dos grupos morfológicos coincidente con los resultados del análisis de conglomerados. Además, el análisis de la varianza multivariado (MANOVA) de las 11 variables morfológicas confirmó diferencias estadísticamente significativas entre los dos grupos morfológicos conformados (prueba hotelling $p < 0,0001$, $F = 71.63$, $gl_{num} = 11$, $gl_{den} = 2381$).

La Tabla 3.2 y la Figura 3.4 muestran las poblaciones que comprenden a cada grupo morfológico y la ubicación geográfica de las mismas respectivamente. Se observa que, los grupos morfológicos no responden a un ordenamiento geográfico. Similar resultado obtuvo Moreno-Contreras *et al.* (2021), quienes sostienen que la variabilidad morfológica observada en las colectas de mezquite (*Prosopis sp.* y *P. laevigata*) tiene una baja asociación con la ubicación geográfica de la localidad muestreada. La Tabla 3.3 presenta los valores medios de cada una de las variables morfológicas para cada morfotipo de la región fitogeográfica del Espinal (MFTES).

Tabla 3.2. Poblaciones participantes de cada grupo morfológico formado

	Grupos	
	1	2
Poblaciones	2- Piquillín	1-Monte Cristo
	6- Parque San Martín	3- Río I
	7- Colonia Nueva	4- Los Chañaritos
	8- Don Justiniano	5- La Francia
	15- Esperanza	9- Plaza de los Algarrobos
	16- Villa María	10- Parque de la Vida
	17- San Jerónimo de los Sauces	11- U.C.C.
	22- Cintra	12- Frontera
		13- Balnearia- Miramar
		14- Norte en RP 70
	18- Cañada de Machado	

19- Villa del Rosario
 20- Ballesteros
 21- Belle Ville

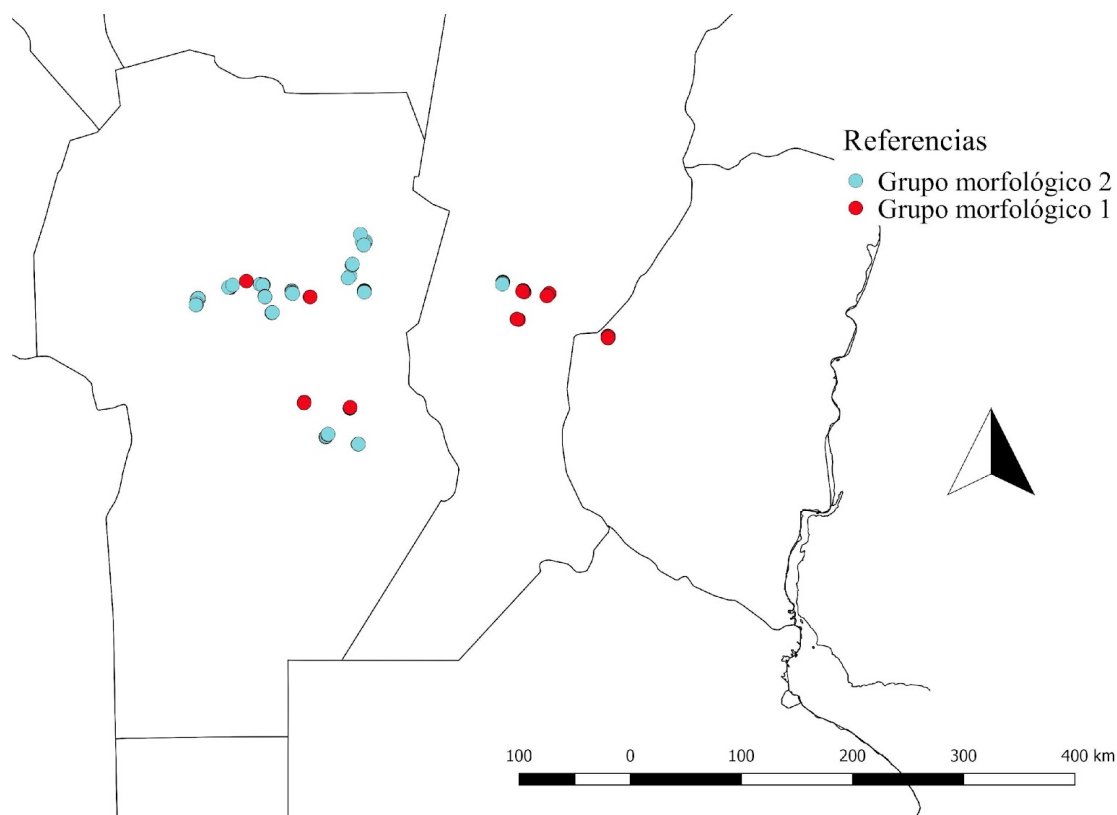


Figura 3.4. Ubicación geográfica de los grupos morfológicos por poblaciones

Tabla 3.3. Caracteres morfológicos de los morfotipos de *P. alba* obtenidos para la región fitogeográfica del Espinal

Grupo	LPE	LPI	NFO L	NP I	LFOL	AFO L	APTOT	ARFO L	DIFO L	ARTOT	L_AFO L
1	2,37	9,2	32,44	2,2 5	0,82	0,12	0,15	0,09	0,29	26,64	6,74
2	2,52	10,34	32,91	2,1 3	0,99	0,14	0,15	0,13	0,32	34,68	7,09
Dif 1vs 2	-0,13	-1,36*	-0,69	0,1 2	-0,22*	-0,02*	0,00	-0,04*	-0,04*	-8,04*	-0,48*

*Diferencias significativas $p < 0,05$

Se evidencia que las hojas de los árboles del grupo 2 presentaron pinas de mayor longitud (LPI), con folíolos más separados (DIFOL), una mayor relación

longitud/ancho foliar (L_AFOL) que el grupo 1, con foliólulos más largos (LFOL) y anchos (AFOL) y, por lo tanto también con mayor área de foliólulo (ARFOL) y de hojas (ARTOT) ($p < 0,05$). Estas características se observan en la Figura 3.5 que muestra a los árboles tipos de los dos grupos, el 8A representativo del grupo 1, población de Don Justiniano y el 11E del grupo 2, población Universidad Católica de Córdoba.

a)



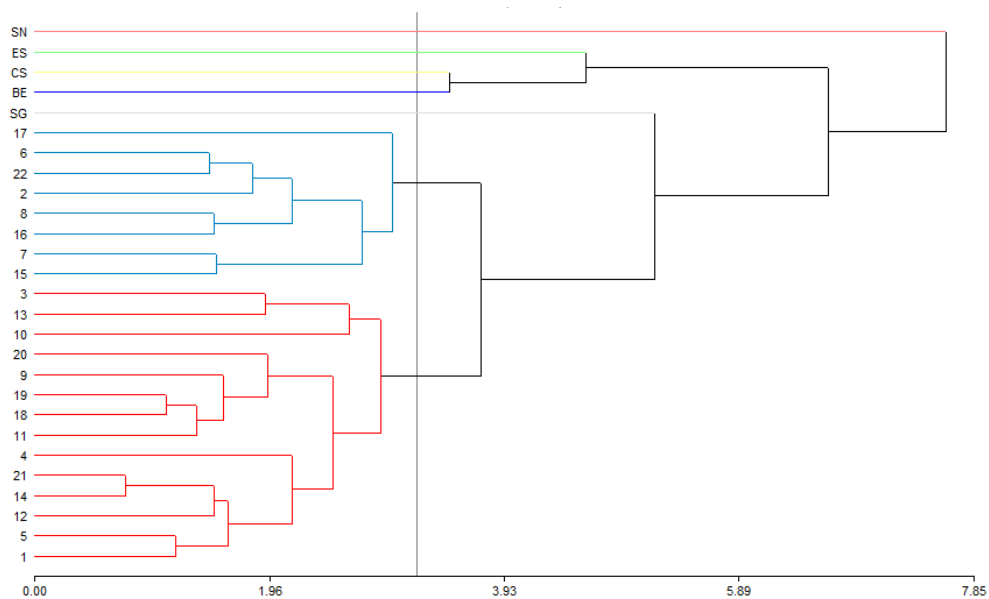
b)



Figura 3.5. Árboles tipo representativos del a) grupo 1, árbol 8A y b) grupo 2, árbol 11E, ambos seleccionados por menor distancia euclídea a la media de los morfotipos

Al incorporar al análisis de conglomerado de la presente tesis los morfotipos de *Prosopis alba* obtenidos por Verga *et al.* (2009), Verga (2014) y Marcó *et al.* (2016), que se obtuvieron en estudios de diferenciación sobre caracteres de hojas de individuos distribuidos en gran parte de la Argentina con el uso de la distancia euclídea (en la Tabla 1 del Anexo 1 se muestran los valores medios de cada morfotipo incorporado), se observa que los MFTESP obtenidos se siguen recuperando (Figura 3.6 a y b). A un nivel de 6,7 de distancia euclídea (Figura 3.6 a) estos MFT se separaron de los MFT Salteño Norte y la menor distancia de separación fue a nivel 3,2 que lo hace con el MFT Santiaguense. La Figura 3.6 b muestra los promedios de los MFTESP y MFT.

a)



b)

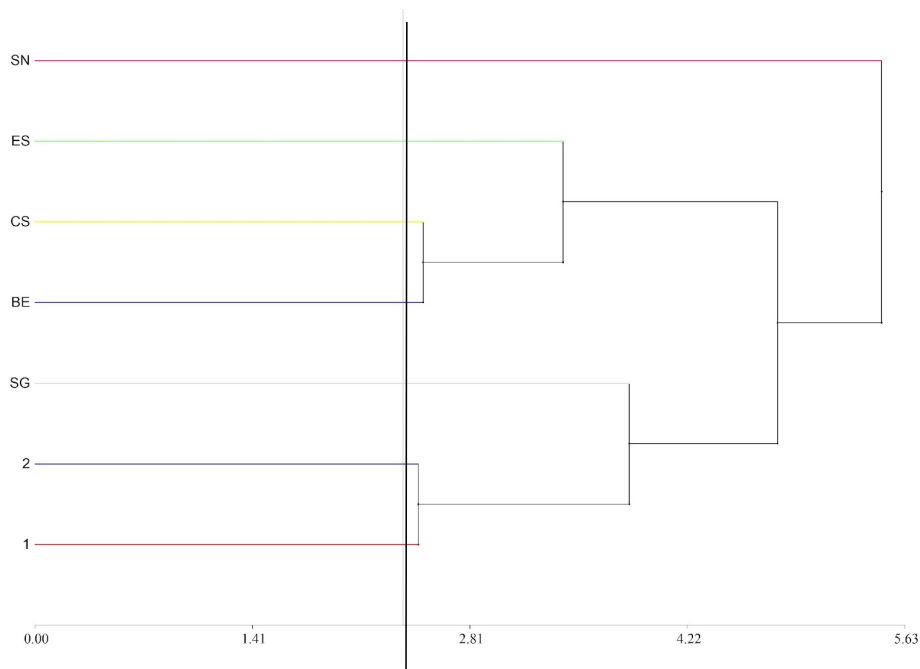


Figura 3.6. Dendrograma obtenido con el método UPGMA de un análisis de conglomerado Jerarquizado realizado con los 5 morfotipos identificados por Verga *et al.* (2009), Verga (2014) y Marcó *et al.* (2016) y a) los 22 sitios resultantes del muestreo (Correlación cofenética 0,91) y Distancia Euclídea de corte: 3,2. b) las medias de los dos grupos morfológicos formados para el Espinal. (Correlación cofenética: 0,810) y distancia Euclida de corte: 2,38.

*Referencias. Morfotipos: SN= Salteño Norte, ES= Espinal, CS=Chaqueño Sur, BE= Bermejo o Chaqueño, SG =Santiagueño

Estos resultados evidencian la existencia de dos nuevos MFT de *P. alba*, que sumados a los 5 ya mencionados hacen un total de 7 MFT de *P. alba* para Argentina. Las características que separaron un MFT de otro se muestran en la Figura 3.7. Se observa que la relación longitud/ ancho del foliólulo (L_AFOL) es la variable que separó a los dos MFTESP de los ya identificados por Verga *et al.* (2009), Verga (2014) y Marcó *et al.* (2016), siendo mayor esta relación para los MFTESP 1 y 2; pero mayor incluso en el MFTESP 2 en relación al 1. El número de pares de foliólulos (NFOL), variable que no fue significativa ($p < 0,05$) para diferenciar entre los dos MFTESP entre sí, se caracterizó por presentar menores valores en relación a los 5 MFT ya reconocidos por la bibliografía. Por otro lado, la variable distancia entre foliólulos (DIFOL) caracterizó al MFTESP 2 del resto de los MFT por poseer el mayor valor.

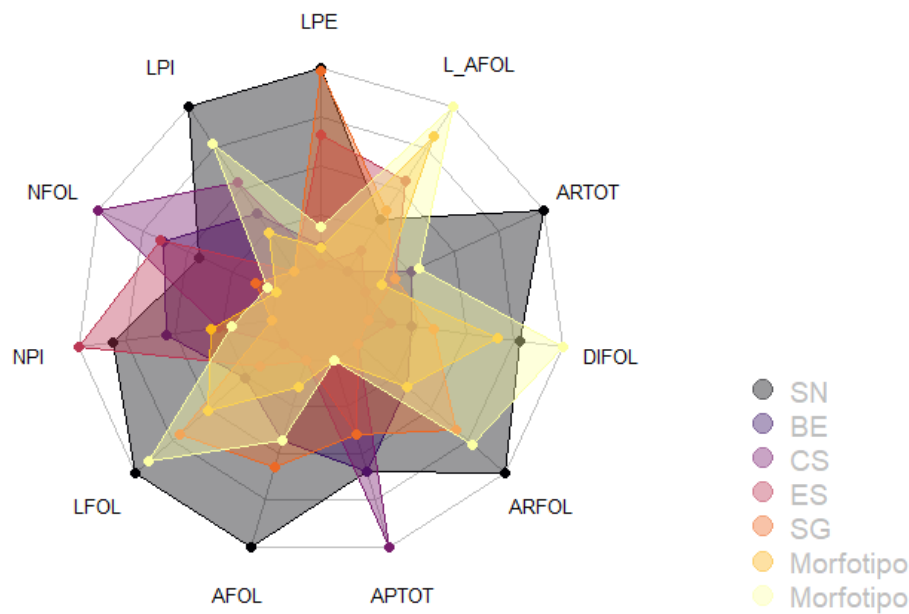


Figura 3.7. Gráfico de estrellas realizado con las 11 variables morfológicas utilizadas para diferenciar los siete morfotipos (2 identificados en la presente tesis y 5 por Verga et al. (2009), Verga (2014) y Marcó et al. (2016))

Tal como se indica en la introducción del presente capítulo, las diferencias morfológicas podrían estar correlacionadas con distancias genéticas Joseau (2006), por lo que en el presente estudio se podría inferir diferencias genéticas. Si bien habrá que comprobarlo en estudios genéticos futuros, Verga *et al.* (2009) afirma que, en general, el grado de diferenciación genética hallado entre grupos morfológicos de estas características implica que pueden ser considerados como unidades con cierta independencia evolutiva.

Caracterización edáfica

Los resultados de las principales propiedades físico- químicas por sitio muestreado se muestran en la Tabla 3.4. En la Tabla 3.5 se observa que los valores de coeficientes de variación de las propiedades físico- químicas de los sitios de presencia de *P. alba* en la región fitogeográfica del Espinal son muy altos, lo que demuestra su diversidad. Resultados similares fueron encontrados por Vicentini *et al.* (2012), quien describe a *P. alba* con gran adaptabilidad a diferentes suelos, y Pérez (2014) que sostiene que la especie está presente incluso en suelos con significativas restricciones ambientales. Al respecto Gracia Senilliani, Bruno y

Brassiolo (2020), para un estudio realizado en la provincia de Santiago del Estero, sostienen que las propiedades químicas del suelo, CE, Na, Ca+Mg y RAS (relación de adsorción de sodio) son determinantes en el crecimiento de *Prosopis alba* en dicha provincia.

Tabla 3.4. Medidas resúmenes por sitio de las principales propiedades físico- químicas de suelos en localidades de presencia de *P. alba* en la región fitogeográfica del Espinal

Sitio	CE (ms/cm)	PH	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	MO (%)	Profundidad (cm)
3	0,19	6,30	16,64	38,7 6	44,60	3,3 5	0- 33,5
4	0,19	7,04	26,93	64,1 6	8,91	1,0 6	0- 14,0
6	0,49	7,41	22,77	58,9 5	18,28	2,5 8	0- 27,3
7	1,46	9,34	16,97	76,7 8	6,24	2,1 5	0- 07,0
9	0,41	6,55	14,13	47,1 2	38,75	2,9 5	0- 10,7
10	0,54	6,84	20,17	66,8 0	13,03	5,2 2	0- 04,0
12	0,27	4,87	22,25	66,8 7	10,89	3,6 4	0- 07,0
13	0,46	8,02	24,63	68,7 5	6,61	2,0 5	0- 15,0
15	1,38	9	25,19	57,2 5	17,56	2,4 4	0- 11,0
16	0,29	6,04	21,95	64,3 0	13,76	3,0 4	0- 30,0
17	1,99	7,87	24,62	71,0 3	04,34	1,9 6	0- 20,0
18	0,36	7,84	20,59	63,2 5	16,16	4,1 3	0- 30,0
19	0,37	7,92	15,90	57,3 4	26,76	1,3 0	0- 30,0
20	0,45	8,59	28,19	59,1 5	12,66	4,0 4	0- 16,0
21	0,24	6,67	20,17	41,6 5	38,18	1,6 2	0- 19,0
22	0,87	8,91	15,39	74,3 2	10,30	3,1 0	0- 22,0

Tabla 3.5. Medidas resúmenes de las principales propiedades físico- químicas de los suelos de presencia de *P. alba* en la región fitogeográfica del Espinal

CE (ms/cm)	PH	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Materia Orgánica en fracción (%)	Profundidad (cm)
---------------	----	----------------	-------------	--------------	-------------------------------------	---------------------

Medi							
a	6,78	3,95	11,03	23,41	9,98	4,33	9,82
CV	264,64	117,53	113,13	120,75	133,82	275,18	133,81

Si bien la gran mayoría de los sitios muestreados presentaron textura franca, encontrando suelos francos, francos limosos, francos arenosos y franco arcillo arenosos, también se encontró uno con textura arcillosa (horizonte 3 del Sitio Parque San Martín) y dos arcillo limosos (horizonte 3 de sitio San Jerónimo de los Sauces y horizonte 2 de sitio Ballesteros) (Figura 3.8). Se destaca que la mayor proporción de sitios presentó textura franco limosas. En cuanto a porcentaje de materia orgánica (MO %) (Tabla 3.4) se destacan los sitios 10 (Parque de la vida), 18 (Cañada de Machado) y 20 (Ballesteros) por presentar altos contenidos de la variable. No se encontraron poblaciones de *P. alba* para la región fitogeográfica del Espinal que crezcan en suelos salinos, como así tampoco en suelos salino-sódicos dado que no se encontraron valores de CE mayores a 4 ms/cm en el muestreo realizado.

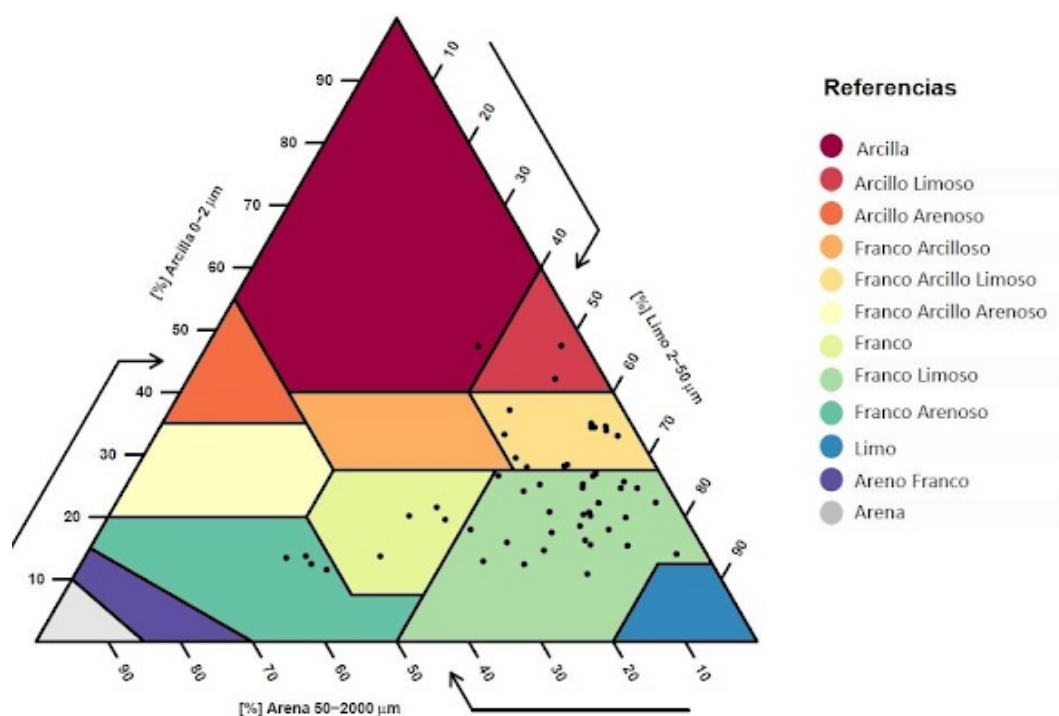


Figura 3.8. Clases texturales de los 16 sitios representados en un triángulo textural.

La caracterización colorimétrica de los perfiles por sitios se presenta en la Figura 3.9, fueron realizados con suelo seco.



Figura 3.9. Caracterización colorimétrica de los suelos en seco de las localidades muestreadas según cartas Munsell. Las localidades están ordenadas alfabéticamente

Las características de las propiedades físico-químicas de los suelos por perfil para cada sitio se muestran en el Anexo 2 (Tablas 1 a 15).

Los resultados visuales de la tendencia espacial de las variables MO (%), CE del horizonte 1, pH y % de Arcilla se muestran en la Figura 3.10. Puede observarse mayores valores de CE y pH en los suelos muestreados hacia el este, mientras que mayores valores de MO se encuentran al oeste. La variable arcilla tiene un comportamiento parejo en el espacio, pero se destacan los menores valores en los sitios cercanos a la ciudad de Córdoba.

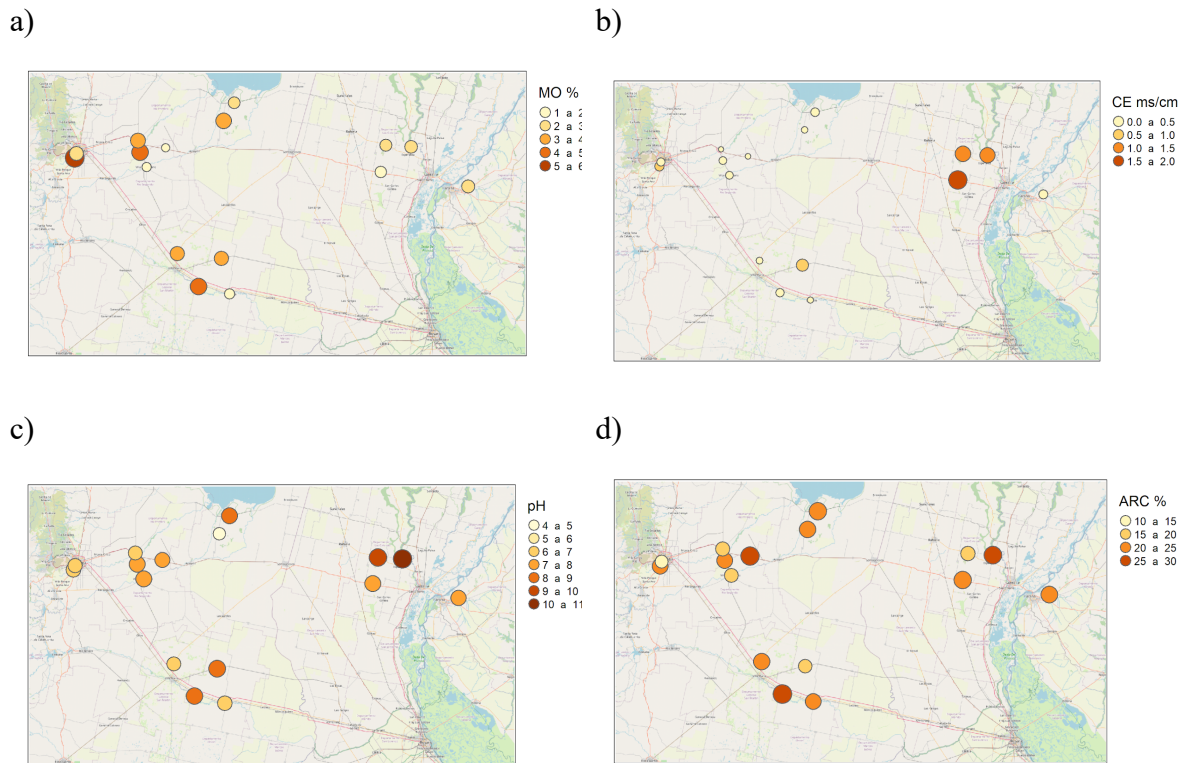


Figura 3.10. Tendencias espaciales de las variables del horizonte 1: a) MO (%), b) CE, 3) pH y d) % de Arcilla. Los mayores valores de las variables se expresan en mayor tamaño de burbujas y colores rojizos más fuertes.

Se encontraron correlaciones significativas (p -valor $< 0,05$) entre las variables edáficas pH (H1) y CE (H1) con un coeficiente de correlación de Pearson de 0,65, lo que explicaría la tendencia espacial observada en la Figura 3.10; y entre arcilla (%) y arena (%), con un coeficiente negativo de 0,52.

Asociación entre la caracterización morfológica y la caracterización edáfica

El análisis de las variables estudiadas evidenció que sólo existen diferencias significativas (p -valor = 0,0031) para conductividad eléctrica (CE) entre los grupos, por lo que los grupos morfológicos formados, edáficamente, sólo se diferencian en CE. Si bien existen numerosos trabajos que identifican morfotipos de *P. alba* (Verga *et al.*, 2009; Verga, 2014; Marcó *et al.*, 2016) y realizan descripciones de los órdenes de suelo donde están presentes los individuos de la

especie (Verga, 2014), no existen trabajos previos que vinculen ambas caracterizaciones. Este trabajo constituye un primer estudio de estas asociaciones.

Las asociaciones observadas en el ACP entre variables edáficas y caracteres morfológicos revelaron que las variables edáficas del horizonte 1 y el horizonte 2 (pH, CE, y profundidad del horizonte) estuvieron correlacionadas, por lo que se trabajó sólo con las variables del horizonte 1 en un nuevo ACP (Figura 3.11). También fueron eliminadas de ese ACP: la variable LFOL por estar correlacionada con ARFOL, y Limo (%) por calcularse por diferencia entre arena y arcilla, y estar correlacionada con Arcilla (%). En base al ACP de las variables seleccionadas (17 de un total de 22 variables) se interpretaron relaciones entre las variables edáficas y caracteres de hojas de los 22 sitios muestreados. La CP1 explica el 33,1 % de la variabilidad total, en donde las variables con mayor peso fueron: AFOL, ARFOL, DIFOL, L_AFOL, MO (%), LPE y CE. La CP2 explica el 18,1 %, resumiendo entre ambas un 52,2 por ciento de la variabilidad total. Las variables de más peso en esta componente fueron: Prof (H1), NFOL y APTOT.

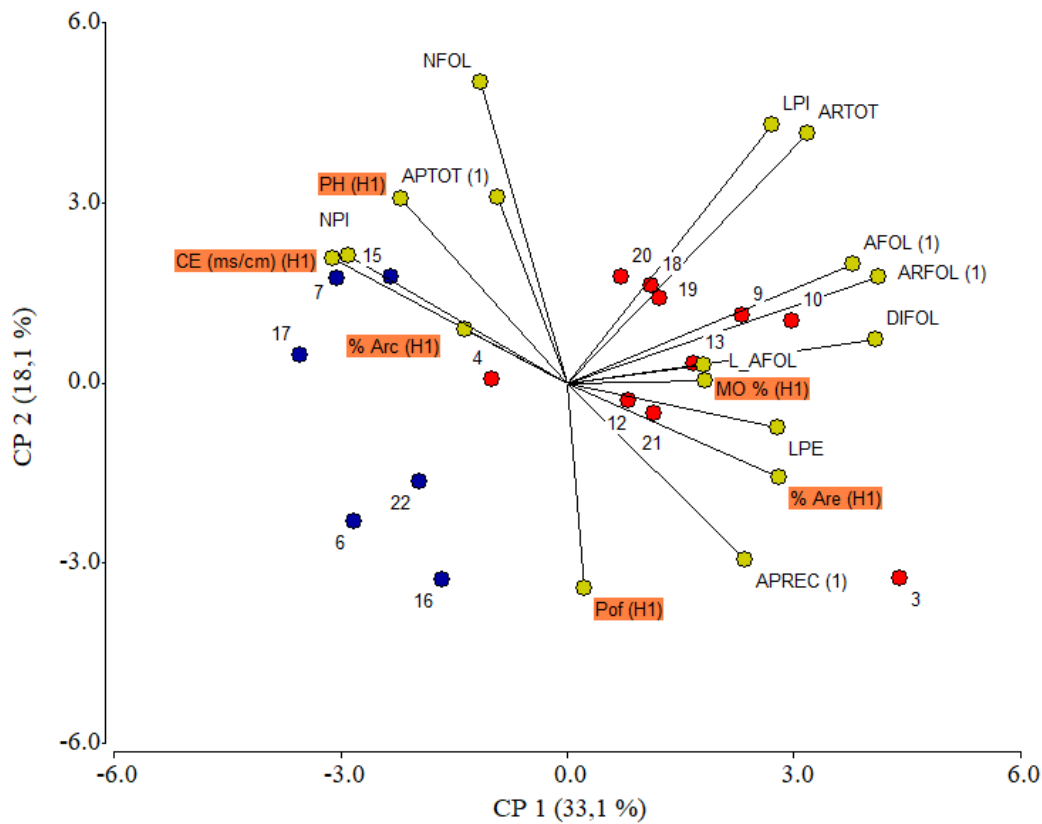


Figura 3.11. Ordenamiento bidimensional de 11 caracteres morfológicos de hojas y 6 variables edáficas (con fondo naranja) de 16 sitios de presencia de *P. alba* de la Región fitogeográfica del Espinal. Puntos color azul: MFTESP 1, y puntos color rojo MFTESP 2.

Así, la menor profundidad del horizonte 1 (Prof) estuvo asociada a sitios que presentaron individuos con mayor número de foliólulos. Por otra parte, suelos con mayores valores de CE y menores porcentajes de arena caracterizaron a los sitios que presentaron individuos con mayor número de pinas; a mayor porcentaje de arena en el suelo se correspondió a sitios con individuos con mayor longitud del pecíolo de las hojas; contenidos menores de arcilla (%) y menor CE se asoció a ejemplares con hojas de mayor longitud del pecíolo; y a mayor porcentaje de MO en el suelo se correspondió con árboles de mayor longitud de pecíolo (LPE) y mayor relación largo/ ancho del foliólulo (L_AFOL). L_AFOL y DIFOL fueron caracteres que contribuyeron a diferenciar los grupos morfológicos de manera significativa en el análisis morfológico. Puede observarse que son variables correlacionadas de forma positiva, así, a mayor relación L_AFOL mayor DIFOL, y a la vez están correlacionadas con MO (%), siendo mayor los valores de las variables a mayor contenido de materia orgánica. Otras relaciones entre los

caracteres que se evidencian de la Figura 3.11 son las encontradas entre NPI, LPE y ARFOL, donde a menor número de pinas y mayor largo del peciolo las hojas presentaron mayor superficie foliar. Algunas de estas relaciones fueron reforzadas por los resultados obtenidos utilizando las correlaciones de Pearson. En la Tabla 3.6 se muestran las relaciones con p-valor < 0,05 y coeficientes mayores a 0,5. Se observa una correlación significativa para longitud del peciolo, siendo esta positiva con el contenido de materia orgánica (a mayor contenido de MO mayor longitud del peciolo), es decir que las poblaciones con mayores valores en cuanto a esta variable serán Parque de la vida, Cañada de Machado y Ballesteros, que presentan contenidos de MO mayor a 4 %. También se observan dos correlaciones significativas pero negativas de longitud del peciolo con: CE y arcilla (%), es decir que a suelos con mayor conductividad eléctrica y más arcillosos corresponderán árboles con peciolos más cortos, un ejemplo de eso es San Jerónimo de los Sauces (suelo con 24.62 % de arcilla y que presenta los peciolos más cortos del muestreo (1,63 cm).

Tabla 3.6. Relaciones significativas entre las variables edáficas (GV1) y morfológicas (GV2) (p< 0,005).

GV1	GV2	Pearson	p-valor
MO % (H1)	LPE	0,53	0,04
MO % (H1)	AFOL	0,55	0,03
CE (ms/cm) (H1)	LPE	-0,65	0,01
% Arc (H1)	LPE	-0,53	0,04

Si se considera que el longitud del peciolo es una medida de crecimiento y de que a mayor contenido de arena en el suelo se corresponde con árboles que tienen mayor longitud de peciolo y mayor área foliar se estaría reforzando lo encontrado por Vicentini y Pérez (2010) y Kees *et al.* (2017) de que suelos franco arenosos o arenosos son sitios de alta calidad para *P. alba* sin tener en cuenta el morfotipo al que pertenecen. Estos autores si bien no relacionan las variables morfológicas con las edáficas, lo hacen con características morfométricas como altura total y diámetro a la altura del pecho. Tal como lo menciona Kees *et al.* (2017) es importante destacar que las correlaciones encontradas (altura dominante con suelos de textura liviana en su caso y mayor largo de peciolo a mayor

porcentajes de arena en la presente tesis) no implican causalidades, pero son relaciones que deben ser tenidas en cuenta ya que indican tendencias.

El resultado del Procrustes generalizado por grupo de variables establecidos (GV1= variables edáficas; GV2= variables morfológicas de hojas) mostró una proporción de consenso de 77,7 %, lo que significa que los grupos se explican uno al otro en ese porcentaje. Este análisis refuerza la importancia del estudio de la interacción entre ambos grupos de variables.

La Figura 3.12 muestra el resultado del PLS, puede observarse que APTOT, variable que no fue significativa en diferenciar los MFTESP, tiene relación con CE, porcentaje de arena y porcentaje de arcilla. Esta relación es directa a la CE y Arc (%), e inversa a Are (%). Asimismo se observa que ARTOT tiene relación con MO (H1) y porcentaje de Arcilla; y que esta relación es directa a la MO (H1), e inversa al porcentaje de Arcilla. Este último resultado y las correlaciones de la Tabla 3.4 ponen en evidencia que la materia orgánica del suelo influye en el desarrollo de los aspectos morfológicos del árbol, en contraposición a lo expresado por Vicentini *et al.* (2012) quienes no observaron correlación de Pearson entre el desarrollo de las variables dasométricas y la materia orgánica del suelo. Resultados similares a los obtenidos por Vicentini, fueron encontrados por Pérez (2014)

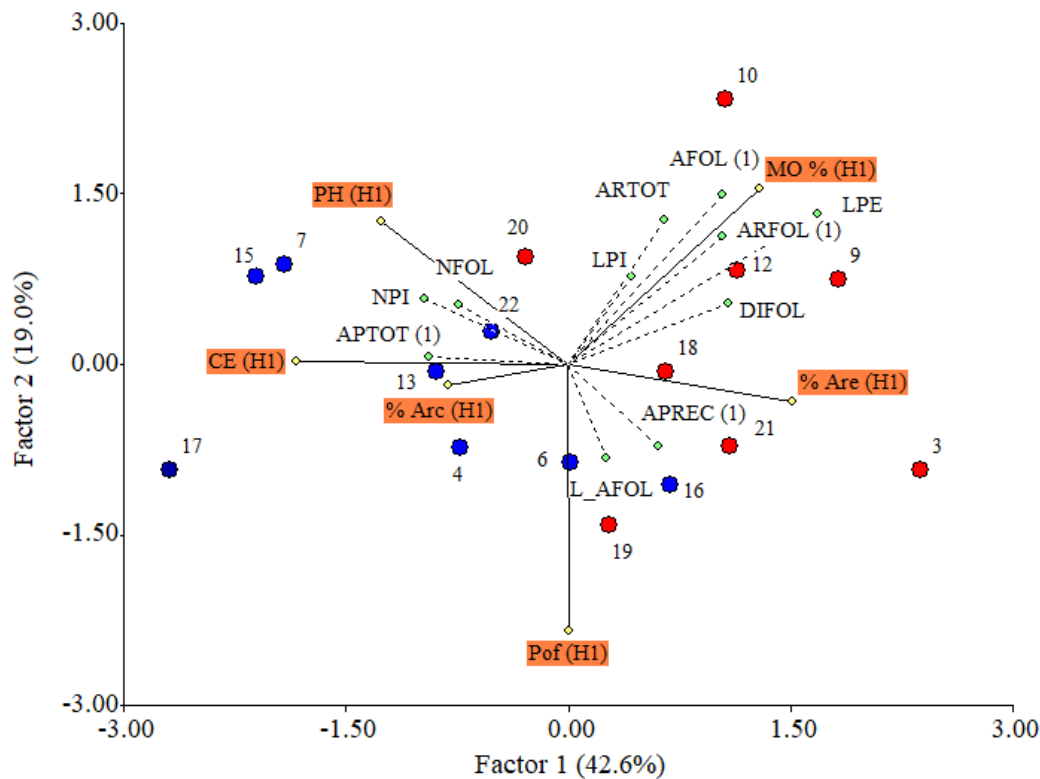


Figura 3.12. *Partial Least Squares* (PLS) entre las variables edáficas como variables predictoras, y a las variables morfológicas como variables respuesta. Puntos azules: MFTESP 1 y puntos color rojo MFTESP 2.

Por otro lado la Figura 3.12 también muestra que la variable edáfica CE (H1), que permitió diferenciar los MFTESP, está directamente relacionada al NFOL (variable que permitió diferenciar los MFTESP de los ya identificados por Verga *et al.* (2009), Verga (2014) y Marcó *et al.* (2016)) e inversamente correlacionada con DIFOL, variable morfológica que permitió diferenciar el MFTESP 2 del resto de los MFT.

En relación a la variable CE y los grupos morfológicos definidos, se presenta en la Figura 3.13 los gráficos 3.4 (distribución de los grupos morfológicos) y 3.10 b (conductividad eléctrica) juntos. Se distingue que si bien los grupos morfológicos no están definidos en el espacio, responden al comportamiento de la variable CE, concentrando varios sitios pertenecientes al grupo morfológico 1 al este donde se ubican los suelos con mayores valores de CE.

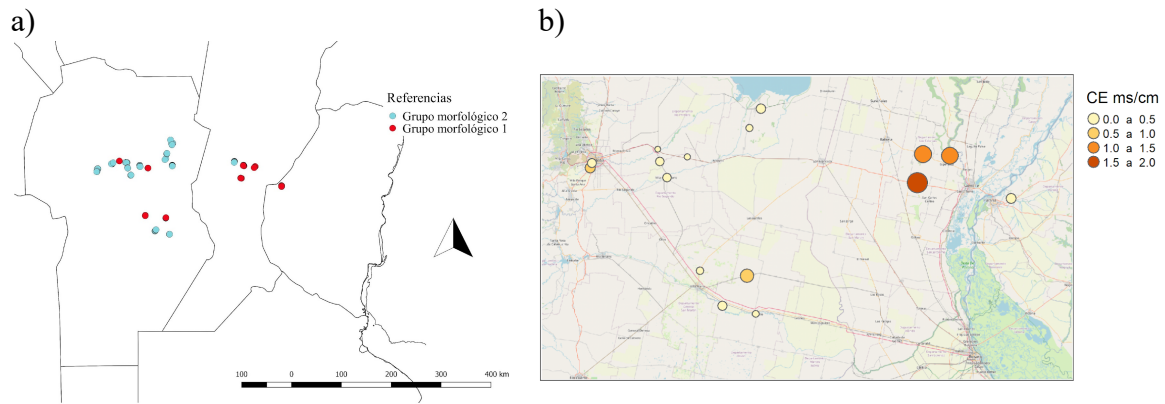


Figura 3.13. a) distribución de los grupos morfológicos definidos para la región del Espinal y b) distribución de la variable conductividad eléctrica de los suelos.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente capítulo dan respuesta a los interrogantes: ¿son las poblaciones de la región del Espinal similares a algunos de los morfotipos ya descritos previamente en la bibliografía en términos de morfología de hojas? ¿Qué características edáficas presentan los sitios muestreados? ¿Influye el componente edáfico en los comportamientos de morfología de hoja? Se concluye que:

La caracterización morfológica de las poblaciones de crecimiento espontáneo de *P. alba* de la región fitogeográfica del Espinal diferencia dos grupos morfológicos distintos a los previamente reportados.

Los grupos morfológicos detectados se diferencian entre ellos en los caracteres de longitud de la pina, longitud del foliólulo, ancho del foliólulo, área foliar, distancia foliar, área total, y relación longitud/ ancho del foliólulo.

Los grupos morfológicos se encuentran en sitios que se diferencian en términos edáficos por la variable conductividad eléctrica.

Existe una concordancia entre los ordenamientos definidos por las variables edáficas y morfológicas.

BIBIOLGRAFÍA

- Beaudette, D.E., Roudier, P. y O'Geen, A.T. (2013) Algorithms for quantitative pedology: a toolkit for soil scientists. *Computers & Geosciences*, **52**, 258-268.
- Besega, C., Pometti, C.L., Ewens, M., Saidman, B.O. y Vilardi, J.C. (2012) Strategies for conservation for disturbed *Prosopis alba* (Leguminosae, Mimosoidae) forests based on mating system and pollen dispersal parameters. *Tree Genetics and Genomes*, **8**, 277-288.
- Brizuela, M. M., Burghardt, A. D., Tanoni, D., y Palacios, R. A. (2000). Estudio de la variación morfológica en tres procedencias de *Prosopis flexuosa* y su manifestación en cultivo bajo condiciones uniformes. *Multequina*, (9), 7-15.
- Burkart, A. (1976) A monograph of the genus *Prosopis* (Leguminosae subfam. Mimosoideae). *Journal of the Arnold Arboretum*, 450-525.
- Charrad, M., Ghazzali, N., Boiteau, V., Niknafs, A. y Charrad, M.M. (2014) Package 'nbclust'. *Journal of statistical software*, **61**, 1-36.
- Charts, M.S.C. (1954) Munsell Color Company. *Inc.*, *Baltimore*, **2**.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C.W. (2018) InfoStat version 2018. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Fontana, M.L., Pérez, V.R. y Luna, C.V. (2018) Evolutive characteristics of *Prosopis spp.*: Cytogenetic, genetic and hybridizations. *Rodriguesia*, **69**, 409-421.
- Gracia Senilliani, M., Bruno, C., y Brassiolo, M. (2020). Factores edáficos y su impacto en la altura dominante en plantaciones de *Prosopis alba*. *Madera y bosques*, 26(3).
- Joseau, J., Verga, A. y Díaz, M. (2005) Los recursos genéticos de *Prosopis*. *Idia XXI. Revista de Información sobre Investigación y Desarrollo Agropecuario*.(Jul 2005). a. 5 (8), 207-211.
- Joseau, M.J. (2006) *Caracterización morfológica y genética de poblaciones del género Prosopis del Chaco semiárido del norte de Córdoba y sur de Santiago del Estero. Tesis para optar al grado de Doctora en Ciencias Agropecuarias*. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Univeridad Nacional de Córdoba.
- Joseau, M.J., Verga, A., Díaz, M. del P. y Julio, N.B. (2013) *Morphological diversity of populations of the genus Prosopis in the semiarid Chaco of northern Cordoba and southern Santiago del Estero*. Scientific Research.
- Karlin, U. y Palacios, R. (1988) *Prosopis* en Argentina. Documento preliminar elaborado para el Primer Taller Internacional sobre Recursos Genético y Conservación de Germoplasma de *Prosopis*. FAO. FCA-UNC-, FAC. CS. EX. Y NAT. UBA, Córdoba.
- Kees, S.M., Michela, J.F., Skoko, J.J., Gomez, C.A., Crechi, E.H. y Letourneau,

- F.J. (2016) Índice de Sitio para *Prosopis alba* en la Provincia del Chaco. *Actas de los resúmenes de las xvii Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales*.
- Kees, S.M., López, A.E., Rojas, J.M., Roldán, M.F., Zurita, J.J. y Brest, E.F. (2017) Características edáficas y su relación con la altura dominante en plantaciones de *Prosopis alba* en la provincia del Chaco. *Revista Forestal Yvyrareta*, **24**, 13-19.
- Kees, S.M., Ferrere, P., Lupi, A.M., Michela, J.F. y Skoko, J.J. (2018) Producción y crecimiento de las plantaciones de *Prosopis alba* Griseb. En la provincia Chaco. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, **44**, 113-120.
- Larguia, A. (1976) Calidad de Sitio para *Pinus elliottii* en Misiones. *Boletín*, 91-95.
- Marcó, M.A., Cortizo, S.C., Fornes, L.F., Gauchat, M.E., López, J.A., López Lauenstein, D., (2016) *Domesticación y mejoramiento de especies forestales. 1a. ed. 201*
- Moreno-Contreras, M. G., Herrera Flores, T. S., Licea De Anda, E. M., Arratia Castro, A. A., y Medina Haro, A. (2021) Diversidad morfológica del mezquite (*Prosopis spp.*) en la región de Pénjamo, Guanajuato, México. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 9 (23).
- Nakazawa, M. (2018) fmsb: Functions for medical statistics book with some demographic data. *R package version 0.5*, 2.
- Palacios, R.A. y Bravo, L.D. (1981) Hibridación natural en *Prosopis* (Leguminosae) en la región chaqueña argentina. Evidencias morfológicas y cromatográficas. *Darwiniana*, 3-35.
- Pérez, V.R., Vicentini, G.M., Vega, C.D. y Ocampo, L. V. (2010) Respuestas de Forestaciones de *Prosopis alba* Griseb. a las Variaciones de Calidad de Sitio (Evaluación Preliminar).
- Pérez, V.R. (2014) Caracterización Edafológica y Silvicultura de Forestaciones de *Prosopis alba* de la Provincia de Formosa. *Producción Forestal*, **4**, 28-32.
- R Core Team, R. (2019) R: A Language and Environment for Statistical Computing (ed RDC Team). R Foundation for Statistical Computing, 1, 409.
- Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A. (1996) Methods of soil analysis, part 3. *Chemical methods*, 1085-1121.
- Verga, A.R. (1995) Genetische Untersuchungen an *Prosopis chilensis* and *P. flexuosa* (Mimosaceae) im trockenen Chaco Argentinien.
- Verga, A. (2000) Hojas. Programa para la medición de caracteres morfológicos de hojas. *INTA. IFFVE*.
- Verga, A. (2005) Recolección de material de algarrobo en el Chaco húmedo y subhúmedo. *SAGPyA Forestal*, 2-7.
- Verga, A. y Gregorius, H.R. (2007) Comparing morphological with genetic distances between populations: A new method and its application to the

Prosopis chilensis - *P. flexuosa* complex. *Silvae Genetica*, **56**, 45-51.

- Verga, A., López, L., López, C., Navall, M., Joseau, J., Gómez, C. (2009) Caracterización morfológica de los algarrobos (*Prosopis sp.*) en las regiones fitogeográficas Chaqueña y Espinal norte de Argentina. *Quebracho*, **17**, 31-40.
- Verga, A., López, C., Navall, M., Joseau, J., Gómez, C., Royo, O. (2013) Caracterización morfológica, distribución geográfica y estimación de nichos ecológicos de algarrobos (*Prosopis sp.*) en las regiones fitogeográficas Chaqueña y Espinal norte de Argentina. , 24.
- Verga, A. (2014) Rodales semilleros de *Prosopis* a partir del bosque nativo. *Quebracho-Revista de Ciencias Forestales*, **22**, 125-138.
- Verzino, E.G. y Joseau, M.J. (2005) El Banco nacional de germoplasma de *Prosopis*: conservación de recursos forestales nativos en Argentina.
- Verzino, G., Joseau, J., Dorado, M., Gellert, E., Rodríguez Reartes, S. y Nóbile, R. (2005) Impacto de los incendios sobre la diversidad vegetal, Sierras de Córdoba, Argentina. *Ecología Aplicada*, **4**, 25-34.
- Vicentini, G.M. y Pérez, V.R. (2010) Caracterización edafológica de los sitios forestados con algarrobo. *XIV Jornadas Forestales de Entre Rios*.
- Vicentini, G.M., Pérez, V. y Rhiner, G. (2012) Evaluación edafológica y silvicultural de forestaciones de *Prosopis alba* como base para una clasificación según calidades de sitio. *Reunión Nacional del Algarrobo*, 13-14.
- Walkley, A. y Black, I.A. (1934) An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, **37**, 29-38.

CAPÍTULO IV

ESTUDIO DE LA VARIACIÓN ADAPTATIVA DE *P. alba* MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN DE ESTRATEGIAS DE BROTAÇÃO EN ENSAYOS DE PROGENIE Y DE TOLERANCIA AL ESTRÉS HÍDRICO A NIVEL DE SEMILLA DE POBLACIONES DE ORÍGENES CONTRASTANTES

INTRODUCCIÓN

Las especies se adaptan a variaciones espaciales y/o temporales utilizando distintas estrategias de adaptación (Levins, 1968), como lo son la selección natural y plasticidad fenotípica. La selección natural altera la frecuencia génica en un ambiente dado para producir una población diferente, actúa directamente sobre el genotipo, que a su vez se manifiesta fenotípicamente (Schmalhausen, 1949; Darwin 1963); en tanto que la plasticidad fenotípica es entendida como la capacidad de un organismo de producir fenotipos diferentes en respuesta a cambios en el ambiente (Schmalhausen, 1949; Gianoli, 2004). En este marco los ensayos de orígenes y progenies de genotipos selectos pueden brindar el conocimiento de los patrones de variación genética y probar su desempeño y adecuación a las condiciones ambientales de los sitios de destino (López *et al.*, 2008).

La genecología es una disciplina específica que estudia la variación intraespecífica en relación con las condiciones ambientales (Mondino, 2014). Los estudios genecológicos son apropiados para investigar la variabilidad genética de las especies en función de la variación ambiental (Wagner y Colombo, 2001). Además de estudios genecológicos es importante realizar estudios fenológicos, ecofisiológicos y particularmente de variación adaptativa para conocer las posibles adaptaciones de las especies a diferentes ambientes a fin de satisfacer la demanda actual y futura de madera.

Los registros fenológicos constituyen un método efectivo para conocer la relación entre la variabilidad climática y el comportamiento de las plantas, así como los posibles efectos que en ellas puedan provocar las modificaciones actuales y futuras del clima (Spano *et al.*, 1999). Parizek *et al.* (2000) sostienen que los estudios fenológicos aportan información relevante para la interpretación de los procesos de especiación involucrados y para planteos de manejo del recurso con fines productivos. El crecimiento potencial, la tolerancia a heladas y el ritmo de crecimiento son las variables compuestas más frecuentemente utilizadas para medir la variación adaptativa de las especies (Dietrichson, 1964; Rehfeldt, 1984).

Existen estudios en el género *Prosopis* que describen el comportamiento de las especies en cuanto a la ocurrencia de su fenofase brotación. Ocampo y Orquin (1990) lo realizaron para *P. flexuosa* en San Luis, Carranza *et al.* (2000) para *P. chilensis* en Córdoba, Parizek *et al.* (2000) para *P. chilensis* y *P. flexuosa* en Córdoba, mientras que Debandi *et al.* (2019) lo hicieron para *P. flexuosa* en Mendoza. Otros autores (Ocampo y Orquin, 1990; Murphy *et al.*, 1999; Garau *et al.*, 2008; Carnelos *et al.*, 2020 y Menzel 2003) estudiaron las relaciones existentes entre la ocurrencia de las fenofases y las variables climáticas; al respecto Menzel (2003) sostiene que existe una fuerte respuesta de las fases fenológicas a la temperatura del aire que ocurren durante la primavera, Ocampo y Orquin (1990), Murphy *et al.* (1999) y Garau *et al.* (2008) registraron una relación directa entre las temperaturas medias y el comienzo de la fase brotación en especies nativas y exóticas y Carnelos *et al.* (2020) sostienen que existe un adelanto en el inicio de la fase de brotación producto del incremento de la temperatura mínima. Ninguno de los estudios mencionados anteriormente fue realizado en *P. alba*

En cuanto al crecimiento de los brotes, Sharifi *et al.* (1983) realizaron una descripción de *P. glandulosa* Meyer en California. Asimismo, Cordoba y Verga (2006) estudiaron el ritmo de floración en un enjambre híbrido entre *P. chilensis* y *P. flexuosa* en el Oeste de la Provincia de Córdoba para comprender el sistema de apareamiento.

En estudios genecológicos de *Prosopis chilensis* de 6 poblaciones (procedencias) de Chile y 17 de Argentina, cosechadas en las provincias de Córdoba, La Rioja y Catamarca, y establecidas en un ensayo de procedencias en la Estación Forestal de INTA- Villa Dolores realizado por Carranza *et al.* (2000), se estudió la variación adaptativa a través del índice de brotación y longitud del primer brote al cuarto año de

crecimiento. En dicho trabajo se comprobó que existe una relación directa entre la velocidad de brotación (índice de Brotación - IB) y la longitud, e inversa entre la velocidad de brotación y la latitud y altitud de las procedencias.

Sin embargo, para conocer la capacidad adaptativa de un material a nuevos sitios, no solo son necesarios los estudios de variación adaptativa a nivel de individuo adulto, sino que también conocer la variación adaptativa de las diferentes poblaciones a nivel de plántula y semillas; más aún ante los cambios que están ocurriendo en el planeta producto del cambio climático (IPCC, 2007; IPCC, 2014). En este proceso existe un patrón general de aumento de temperatura y un incremento de zonas áridas en zonas actualmente secas (Moreno, 2005), por lo cual estudiar la capacidad germinativa en relación a estos factores resulta necesario. Al respecto se conoce que el desarrollo de estrategias adaptativas durante las etapas tempranas (primer ciclo de crecimiento) parecen determinantes para la supervivencia en ambientes con estrés hídrico (López Lauenstein *et al.*, 2012).

Varios autores (Felker *et al.*, 1981; Jarrell y Virginia, 1984; Rhodes y Felker, 1988; Zhao y Harris, 1992; Passera, 2000; Joseau, 2006) describen al género *Prosopis* con gran capacidad de germinar en condiciones de elevado estrés hídrico y salino e incluso de alta concentración de sodio, como así también, observan una adaptación a la germinación de la especie en altas temperaturas (25-40°C) (Joseau, 2006; Passera, 2000). Según Galera (2000) condiciones de estrés temprano, provocadas por altas temperaturas, falta de agua y salinidad durante la germinación, no afectan en mayor grado el desarrollo de plántulas de *Prosopis*.

Existen antecedentes en ensayos de estrés hídrico en el género *Prosopis* a nivel de plantín en condiciones controladas. Así López Lauenstein *et al.*, (2012) llevaron a cabo un ensayo en invernadero donde se evaluó el crecimiento de plantines de *P. chilensis* y *P. flexuosa* de dos meses sometidos a tres tratamientos de riego. En relación a *P. alba*, Marcó *et al.* (2016) realizó una caracterización de los mecanismos de tolerancia al estrés hídrico comparando dos morfotipos de *Prosopis alba* (“Chaqueño” y “Santiagoño”). El ensayo fue realizado a nivel de plantín, sometiendo en invernadero a los individuos de un mes y medio de edad en tres condiciones controladas de disponibilidad de agua. Se encontraron diferencias entre los morfotipos en cuanto a contenido de malondialdehído y prolina.

A nivel de semilla, el efecto que la disponibilidad hídrica tiene sobre la germinación de diferentes especies del género fue estudiado por varios autores a través de los años. Bazzaz (1973) encontró que *Prosopis farcta* (Banks *et Sol.*) Eig tenía la capacidad de germinar en potenciales agua de -0,8 MPa. Arce y Balboa (1988) reportó valores de 80 % de germinación en hasta -3,0 MPa. Catalán *et al.*, (1993) encontraron una disminución del 50 % en el porcentaje de germinación de *P. flexuosa* causada por cada 0,5 M de ClNa. Todos estos autores utilizaron cloruro de sodio (ClNa) para simular el potencial osmótico, sin embargo no tuvieron en cuenta el efecto adicional que esta sal ocasionaba sobre la germinación. El efecto tóxico de las sales sódicas fue verificado por Perez y Tambelini (1995), quienes realizaron ensayos de germinación bajo diferentes potenciales agua, generados por ClNa, Cl₂ Ca, SO₄ Na₂ y C₆H₁₄O₆ (manitol). Los tratamientos cubrían un espectro de potenciales agua desde 0 a -1,5 MPa y en todos los casos la presencia de sodio afectó en mayor porcentaje la germinación, producto de su acción tóxica sobre las membranas celulares (Passera, 2000).

Polietilenglicol (PEG) 6000, sal no sódica, fue utilizada por Cony y Trione (1998). Dichos autores, trabajando con *Prosopis flexuosa* y *P. chilensis* a una temperatura de 25 °C, encontraron que el porcentaje de germinación total en ambas especies permaneció inalterado hasta 1,0 MPa y que las semillas germinaron hasta un potencial agua de -2,00 MPa, resultando *P. flexuosa* la especie más resistente.

Otro factor importante en el proceso germinativo es la temperatura, de manera que cada especie posee un rango de temperaturas óptimas, así como también temperaturas cardinales a las que la germinación no se verifica (Passera, 2000). Al respecto Sosebee y Wan (1987) indican que la temperatura óptima para la germinación de *Prosopis glandulosa* Torr. y *P. vetulina* Wooton es de 30 °C; Cony y Trione (1996) definieron como rango de temperaturas óptimas de germinación para *P. flexuosa* a 20- 25 °C y para *P. chilensis* a 25- 40 °C. Más recientemente Joseau (2005) sugiere seguir las especificaciones señaladas por las reglas ISTA (2016) para *Robinia pseudoacacia* L. dada la similitud de esta especie con las del género *Prosopis* (oscuridad por 16 h con temperatura de 20 °C y luz por 8 h con temperaturas de 30 °C) y los estudios realizados por Catalán y Balzarini (1992) sobre las condiciones de germinación de especies del género *Prosopis*. Venier *et al.* (2015) sostienen que existe una variación en los

requerimientos climáticos de germinación para diferentes orígenes dentro de una misma especie y plantean un ensayo utilizando cuatro ecotipos de *P. alba*, los que someten a 4 regímenes de temperatura. Sus resultados demuestran, que en las temperaturas 20 \leq 10 ° C, 25 \leq 15 ° C y 35 \leq 20 ° C, las semillas de todas las procedencias tuvieron altos porcentajes de germinación, especialmente las semillas del ecotipo Salteño Norte y Chaqueño, que mostraron los valores más altos.

Por otro lado Aparecida Delachiave y Zambello de Pinho (2003); Fanti y Andrade Perez (2004); Blum (2005); De Santa Olalla Mañas y Calera Belmonte (2005) y Ojeda-Silvera *et al.* (2015) han realizado estudios en diversas especies teniendo en cuenta la interacción de los factores planteados (potencial osmótico y origen). En particular el trabajo de Aparecida Delachiave y Zambello de Pinho (2003) estudia el efecto de tres potenciales osmóticos en la tasa de germinación de semillas de *Senna occidentalis*. Fanti y Andrade Perez (2004), analiza el efecto del estrés hídrico y salino simulado con manitol y PEG 6000 (estrés hídrico) y NaCl, KCl e CaCl₂ (estrés salino) sobre la tasa de germinación de *Chorisia speciosa* St. Hil. Blum (2005), realizado el carácter de revisión, analiza la asociación entre potencial agua, la resistencia a la sequía y la eficiencia en el uso del agua. De Santa Olalla Mañas y Calera Belmonte (2005) analiza las relaciones entre la disponibilidad hídrica y las variables morfo- métricas. Ojeda- Silvera *et al.* (2015) determina el efecto de tres niveles de estrés hídrico en el porcentaje de emergencia, longitud de radícula, altura de planta y biomasa fresca de radícula y parte aérea en 20 variedades de albahaca (*Ocimum basilicum* L.).

No se han encontrado investigaciones que analicen el proceso de germinación teniendo en cuenta la interacción entre los factores (temperatura, disponibilidad hídrica y origen) en *P. alba*, por lo que resulta interesante emprender estudios al respecto. Es de destacar que todos los ensayos enumerados, tanto de germinación a diferentes potenciales osmóticos, como temperaturas han sido realizados en laboratorio debido a que está comprobado que los resultados de germinación obtenidos en laboratorio pueden ser usados para predecir la germinación a campo (Passera, 2000).

Estudios relativos a los anteriormente expresados que permitan conocer la capacidad adaptativa de diferentes orígenes de *P. alba* y posibiliten la selección de material apto para sitios forestales heterogéneos son necesarios para dar respuestas a los

planes de forestación y conservación exigidos por las actualmente vigentes Leyes N° 25.080 y 26.331 sobre bosques cultivados y nativos a nivel nacional.

El objetivo del presente Capítulo fue estudiar la variación adaptativa de *Prosopis alba* mediante la caracterización de estrategias de brotación en ensayos de progenie y tolerancia al estrés hídrico a nivel de semilla de poblaciones de orígenes contrastantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Análisis de la variación adaptativa según estrategias de brotación de poblaciones de *P. alba* en ensayo de progenie

Área de estudio

Para el presente estudio se utilizó un ensayo de progenie de 8 años ubicado en la provincia de Santiago del Estero (27°56'45,1" S; 64°13'12,5" O), con un sitio caracterizado por poseer una altitud de 174 metros sobre el nivel del mar, precipitación anual promedio de 578 mm, temperatura (T°) promedio anual de 20,7 °C y temperatura promedio máxima / mínima de 35,2 °C / 5,1 °C respectivamente (Salto, 2011), suelo Haplustol árido, de textura franco-arenosa, siendo su principal limitación la baja retención de humedad (SAGyP e INTA, 2013).

Al momento del estudio (año 2016), el ensayo estaba formado por 3.671 árboles de 202 progenies (familias) de *P. alba* de poblaciones originarias de las provincias de Santiago del Estero, Chaco, Salta, Formosa y Entre Ríos. El ensayo fue instalado con un diseño de 3 bloques completamente al azar en parcelas de árbol único no contiguas con un número variable de repeticiones por familia (entre 15 y 21 individuos) y un borde perimetral simple. La distancia de plantación fue de 4 x 4 m en los tres bloques (625 árboles por hectárea) sin que les hubieran realizado ningún tratamiento intermedio de poda o raleo.

Del total del ensayo, se seleccionaron 88 familias de interés por su contrastante ubicación geográfica o comportamiento climático de los sitios de origen. Estas 88 familias fueron clasificadas en 16 orígenes geográficos y climáticos (OGC), referidos: 4 a condiciones climáticas (Precipitación mayor a 1.100, Precipitación menor a 550, T

máxima media enero de 36 °C, T mínima media julio de 3,7 °C), 11 al lugar de origen y 1 a elevación. Los orígenes fueron: Chaqueño, Chaqueño Sur, Salteño Norte, Salteño Centro, Bermejo- Salta, Formosa Norte (Formosa N), Santiago Sur (Santiago S), Entre Ríos, Santiago Norte (Santiago N), Santiago Este (Santiago E), Santiago Oeste (Santiago O) (Figura 4.1).

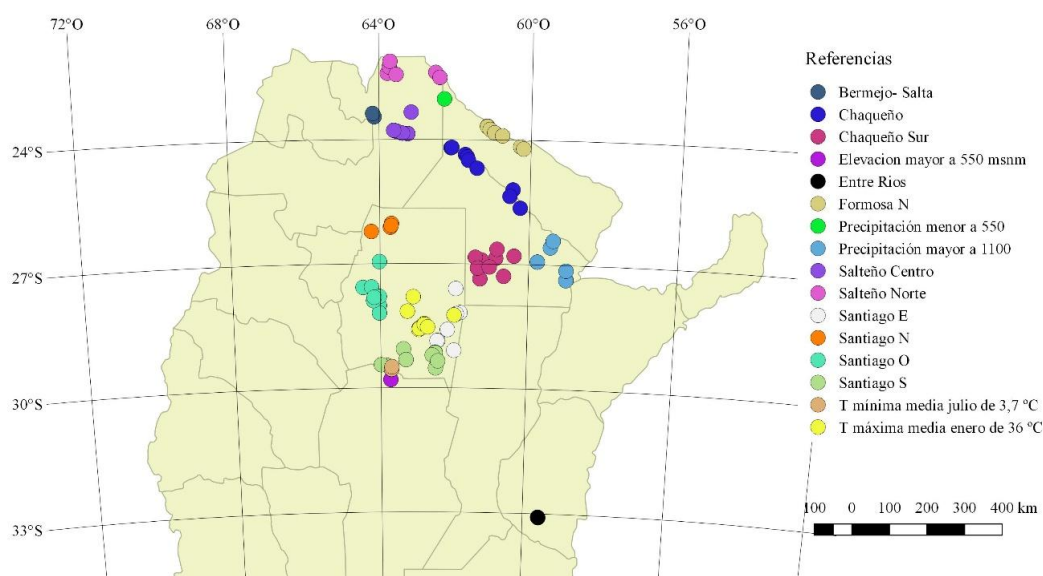


Figura 4.1. Distribución de los 16 orígenes geográficos y climáticos seleccionados.

En la Tabla 4.1 se caracteriza a los 16 OGC utilizando 7 variables climáticas de interés (T° media anual (TMA), T° mínima media del mes más frío (TMF), T° máxima media del mes más caliente (TMC), elevación, precipitación, longitud y latitud).

Tabla 4.1. Caracterización geográfica- climática de los 16 OGC seleccionados.

Origen (cantidad de individuos colectados)	TMA (°C)	TMF (°C)	TMC (°C)	Elevación (m.s.n.m)	Precipitación (mm)	Latitud (grados)	Longitud (grados)
Bermejo- Salta (6)	22,82	9,30	34,42	259	767	-23,680	-63,690
Chaqueño (10)	22,46	9,42	34,63	147	798	-24,900	-61,130
Chaqueño Sur (10)	21,72	8,37	35,19	100	943	-26,980	-60,910
Elevación mayor a 550 msnm (2)	19,60	5,80	31,85	583	915	-26,020	-63,730
Entre Ríos (2)	17,70	6,30	31,80	9	1027	-33,090	-59,550
Formosa N (7)	22,96	10,20	34,73	156	670	-23,890	-60,800
Precipitación mayor a 1100 (6)	21,50	9,78	33,62	69	1218	-26,960	-59,250
Precipitación menor a 550 (2)	23,00	9,60	34,55	233	516	-22,760	-62,350
Salteño Centro (4)	22,90	9,30	34,78	238	754	-23,820	-63,450
Salteño Norte (4)	22,47	9,13	33,64	392	854	-22,490	-63,270
Santiago E (8)	20,89	6,80	35,70	95	793	-28,450	-62,100

Santiago N (4)	21,38	7,15	34,13	265	669	-26,110	-63,840
Santiago O (9)	20,74	5,42	35,14	178	592	-27,730	-64,150
Santiago S (11)	19,40	4,96	33,72	247	752	-29,350	-63,200
T máxima media enero de 36 °C (9)	21,03	6,40	36,34	110	659	-28,370	-62,840
T mínima media julio de 3,7 °C (2)	17,80	3,37	31,63	556	762	-29,610	-63,710

Caracterización de la variación adaptativa

La variación adaptativa según estrategias de brotación (EB) fue analizada a través del índice de brotación construido para cada OGC, el modelado del porcentaje de brotación en función del tiempo y el análisis de las velocidades medias de crecimiento de los brotes (VMCB) por OGC. Para sus cálculos se tomó al azar una muestra de 502 individuos pertenecientes a los tres bloques del ensayo (177 individuos del bloque I, 178 individuos del bloque II y 147 individuos del bloque III), todos los individuos tenían buena forma y estado sanitario. Se midieron el diámetro a la altura de pecho (DAP) y altura total, a la vez que se realizaron 16 observaciones fenológicas en los individuos marcados entre el 21 de agosto y el 8 de octubre del 2016; mediciones con las cuales se establecieron: el momento de inicio de brotación siguiendo las consideraciones establecidas por Parizek *et al.* (2000) para yema brotada y el porcentaje de brotación (según Carranza *et al.*, 2000) en las 16 fechas de observaciones.

Índice de Brotación. Para estimar la velocidad de brotación de los OGC se elaboró el Índice de Brotación de *Prosopis alba* para Santiago del Estero (IB), basado en el Índice de Brotación de Carranza *et al.* (2000) [Ec.1].

$$IB = \ln \ln \left(\sum_i^k \frac{B_i}{P_i} \right) \quad [\text{Ec.1}]$$

donde B_i es el porcentaje de brotación (evaluado como el nivel de brotación observado en el árbol momento del registro) en la observación i -ésima, P_i es el número de días transcurridos desde el inicio de las observaciones hasta la observación i -ésima, y k es el número total de observaciones. En este índice, un individuo que presenta el 100 % de brotación el primer día de observación presentará un valor de IB igual a 4,6, valores menores se corresponden a un retraso en el inicio de la brotación en el tiempo. Es de destacar que este índice está afectado por la duración del período entre que

comenzaron las observaciones y el momento de brotación. Se realizó un ANAVA con el software estadístico Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2018) a partir de un modelo lineal mixto, considerando el factor de diseño Bloque como efecto aleatorio y el factor OGC como efecto fijo. Se realizaron contrastes entre los OGC a partir de la prueba a posteriori DCG, identificando grupos de comportamiento respecto al índice de brotación (grupos de brotación -GB). Los orígenes que formaron cada GB fueron graficados en un mapa de la Argentina utilizando para esto el programa QGIS (QGIS Development Team, 2016). Se calculó la autocorrelación espacial del IB con Índice de Moran. Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) y un ANAVA de los GB en función de las variables climáticas (TMA, TMF, TMC, elevación, precipitación, longitud y latitud) para identificar que variables definían a los grupos formados.

Brotación en el tiempo. Se modeló el comportamiento del porcentaje de brotación en función del tiempo por grupo de brotación a partir de un modelo logístico [Ec.2].

$$B(t)_i = \frac{\alpha}{1 + e^{\frac{-(t - (\beta + u_i))}{\gamma + v_i}}} \quad [\text{Ec.2}]$$

donde $B(t)_i$ es el porcentaje de brotación (%) para el GB $_i$, mientras α , β y γ son los parámetros que definen la función logística, t es el número de días desde el comienzo de las observaciones y, u_i y v_i son términos que modifican la ecuación logística media según el GB.

Se consideró el efecto GB como efecto aleatorio sobre los términos del modelo β y γ , los cuales modifican la pendiente de la curva, de esta manera se construyó una curva de brotación para cada grupo, así como también una curva que representa el comportamiento medio de los GB. Se identificaron los valores de u_i , y v_i conocidos como BLUP's (por sus siglas en inglés: *best linear unbiased predictor*) para cada GB y se obtuvieron las ecuaciones que describen sus comportamientos.

Velocidad media de crecimiento de los brotes. Se seleccionaron, en cada OGC, los tres árboles de mayor diámetro (DM), uno de diámetro intermedio (DI) y los

tres de menor diámetro (Dm), todos diámetros registrados a altura de pecho (DAP), metodología de selección adoptada por Frassoni y Joseau (2019), haciendo un total de 112 árboles (16 criterios por 7 árboles de cada criterio). La Tabla 4.2 muestra las medias diferenciales ($p < 0,05$) de clases diamétricas establecidas y que se definen como material de este ensayo.

Tabla 4.2. Diámetro a la altura de pecho (DAP) por clase diamétrica.

Clases diamétricas	(DAP) cm	
Dm	6,14	A
DI	14,68	B
DM	23,44	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$). Referencias: Dm= Diámetro menor, DI= diámetro intermedio, y DM= Diámetro mayor (Frassoni y Joseau, 2019)

Se marcaron 8 brotes por árbol: 2 brotes en orientación norte, 2 en orientación sur, 2 en orientación este y 2 en orientación oeste (Figuras 4.2 a y b). Se realizaron entre una y tres mediciones según el momento de brotación. La variable registrada fue longitud del brote en cm en diferentes fechas de medición en un período de 43 días (del 26/08/2016 al 7/10/2016). Se determinó la velocidad media de crecimiento de los brotes (VMCB) para el período medido, determinado dividiendo el crecimiento total alcanzado (cm) al momento de finalizar el ensayo sobre la cantidad de días en la que ocurrió ese crecimiento.

Se efectuó un modelo lineal mixto con el Programa InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2018), considerando como variable respuesta la VMCB en función del DAP y del OGC. Se consideró como efecto aleatorio a los factores del diseño experimental, orientación del brote y bloque. Se corrigió heterasticidad por origen y se realizaron contrastes entre los OGC a partir de la prueba a posteriori DCG, identificando grupos de comportamiento respecto a la VMCB. Los grupos resultantes fueron graficados en un mapa de la Argentina, utilizando para esto el programa QGIS (Quantum, 2016). Se calculó la autocorrelación espacial de la velocidad media de crecimiento de los brotes con Índice de Moran. Se realizó un ANAVA de los grupos de VMCB en función de las

variables climáticas (TMA, TMF, TMC, elevación, precipitación, longitud y latitud) para identificar que variables definían a los grupos formados.

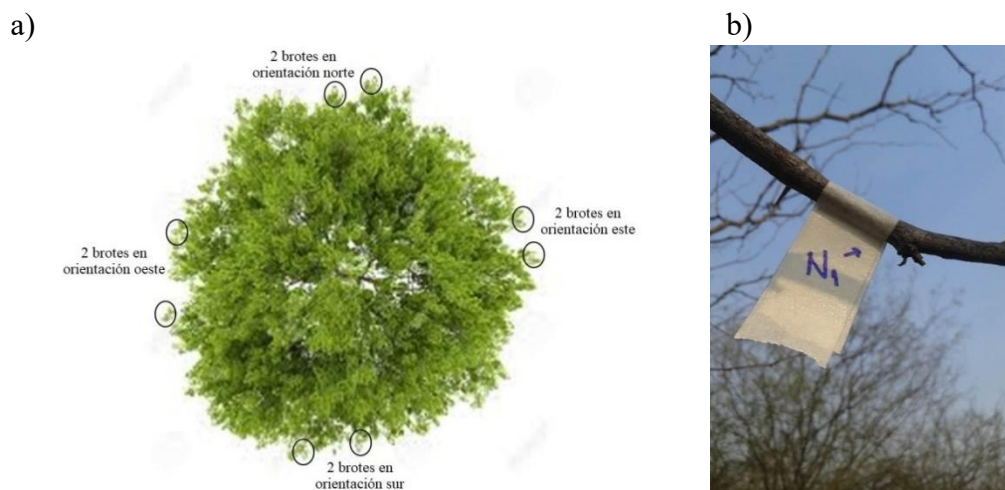


Figura 4.2. Detalles de la metodología de obtención de los datos de brotación: a) Vista superior del árbol con ubicación de los brotes marcados y b) brote marcado en orientación norte.

Análisis de la variación adaptativa de poblaciones de *P. alba* en ensayo de estrés hídrico a nivel de semilla

El material de estudio fueron semillas de 8 orígenes de *Prosopis alba* seleccionadas por su ubicación tanto geográfica como climática y edáfica (Tabla 4.3). Debido a que alguna de las poblaciones seleccionadas fueron las muestreadas en la región fitogeográfica del Espinal y se disponía de escasa cantidad de material, dado que las temporadas 2016- 2017 fueron años de baja producción en frutos por parte de los algarrobales, se decidió ajustar el ensayo de estrés hídrico, con dos ensayos previos a fin de desarrollar el definitivo. Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Fisiología Vegetal de la FCA-UNC bajo la tutoría de la Ing. Agr. (M. Sc.) Silvina Elizabeth Fiant.

En los pre-ensayos, las semillas fueron sembradas en bandejas sobre 2 hojas de papel Valot® doble hoja humedecido con una solución de polietilenglicol (PEG) 6000 a diferentes concentraciones, calculadas con la fórmula empírica utilizada por Kaufmann and Michel (1973), que simula diferentes potenciales hídricos (tratamientos). Las bandejas fueron envueltas en bolsas transparentes y colocadas en cámara de germinación a temperatura alternada de 20<=>30 °C y con fotoperíodo de 16 h (O) – 8 h (L). Se

evaluaron el número de semillas germinadas (SGE) y la longitud de la raíz principal (LR).

Primer Pre-ensayo. Los tratamientos resultaron de la combinación del origen y diferentes potenciales osmóticos. Se trabajó con dos orígenes: Campo Durán (Salta-BNGP N°: 4000) y Villa María (Córdoba- BNGP N°: 4472), que son el extremo Norte y Sur respectivamente de la distribución de la especie en Argentina. Los potenciales hídricos medidos en MPa fueron: 0 (Testigo), -0,4, -0,8, -1,2, -1,5, -1,9, y -2,2 MPa). El ensayo comenzó el 26/07/2017 y las bandejas se incubaron durante 14 días. Las variables registradas fueron cantidad de semillas germinadas y longitud de la raíz principal, contabilizadas a partir del primer día y cada 24 horas. Se consideró semilla germinada cuando hubo una emergencia de radícula de 2 mm de longitud (germinación fisiológica). En ambos casos se diferenció si se trataba de semillas o plántulas (P), considerando plántula normal (PN) a los 7 días de germinadas con todas las estructuras que la caracterizan y a ese valor como el valor de poder germinativo (PG) (Catalán y Balzarini, 1992; Joseau, 2005). Luego de 14 días se trasladaron las semillas no germinadas de los tratamientos -0,8, -1,2, -1,5 y -1,9 MPa del sustrato salino a un sustrato con agua destilada por 7 días. Cumplidos los 7 días se realizó el recuento de plántulas normales. Debido a que en los tratamientos -1,5, -1,9 y -2,2 MPa no se observaron semillas germinadas, se realizó el segundo pre- ensayo con una sola población, utilizando como límite la concentración de -1,2 MPa, e incorporando dos nuevos tratamientos con concentraciones de -0,6 y -1 MPa.

Segundo Pre-ensayo. El segundo pre-ensayo se realizó con semillas del origen Campo Durán (Salta- BNGP N°: 4000) con las concentraciones elegidas del primer pre-ensayo medidos en MPa: 0 (Testigo), -0,4, -0,6, -0,8, -1 y -1,2 MPa a la temperatura considerada óptima ($20 \leq 30$ °C) y a fotoperiodo de 16 h (O) – 8 h (L). El ensayo comenzó el 8 de agosto de 2018. Se realizaron 13 recuentos de germinación entre la fecha de inicio y la fecha de recuento final. La variable medida fue semillas germinadas en diferentes fechas de conteo. Se consideró semilla germinada cuando hubo una emergencia de radícula de 2 mm de longitud (germinación fisiológica). A medida que las semillas germinaban se fueron descartando y, transcurridos 20 días desde el inicio del ensayo se contabilizó la cantidad de semillas germinadas (SGE_{20}) que fue expresada

en porcentaje. Concluido los 20 días, las semillas de los tratamientos -0,8, -1 y -1,2 MPa que no habían germinado, fueron trasladadas a un sustrato con agua destilada por 7 días. Cumplidos los 7 días (04/10/2018) se realizó un recuento de plántulas (%), considerando plántula normal (PN) a los 7 días de germinadas con todas las estructuras que la caracterizan (Catalán y Balzarini, 1992; Joseau, 2005).

Ensayo. Las semillas de las poblaciones seleccionadas fueron sembradas en bandejas a diferentes potenciales osmóticos, utilizando para esto 2 hojas de papel Valot® doble hoja humedecido con polietilenglicol (PEG) 6000 con potenciales hídricos de 0 (Testigo), -0,8, -1,2 MPa (Gonzalez, 2007). Las bandejas fueron envueltas en bolsas transparentes y colocadas en cámara a temperatura alternada de $20 \leq 30$ °C y con fotoperiodo de 16 h (O) – 8 h (L). Asimismo, se probó un escenario diferente de temperatura como el sugerido por Pece, Acosta y Sobrero (2013) de $10 \leq 35$ °C. Se evaluaron cada 24 h el número de semillas germinadas (SGE), considerando semilla germinada cuando hubo una emergencia de radícula de 2 mm de longitud (germinación fisiológica). A medida que las semillas germinaban se fueron descartando, a excepción de 20 semillas (en los casos posibles) por población extraídas cuando iban germinando, las cuales fueron trasladadas a otra bandeja con el mismo potencial osmótico y utilizadas para determinar la longitud de la raíz principal a los 21 días (LR_{21}) de las plántulas normales. A los 21 días se dio por concluido el ensayo y se contabilizó la cantidad de semillas germinadas SGE_{21} que fue expresada en porcentaje.

Se calculó la tasa de germinación utilizando la Ecuación de Maguire (1962) [Ec. 1].

$$M = n_1/t_1 + n_2/t_2 + \dots n_{30}/t_{30} \text{ [Ec. 1]}$$

dónde: $n_1, n_2, \dots n_{30}$ son el número de semillas germinadas en los tiempos $t_1, t_2, \dots t_9$ (en días).

Las semillas de los tratamientos -0,8 y -1,2 MPa, que no habían germinado, fueron trasladadas a un sustrato con agua destilada por 7 días. Cumplidos los 7 días (04/10/2018) se realizó un recuento de la germinación logrado, y se calculó el PG.

Tabla 4.3. Orígenes de las semillas de *P. alba* utilizadas en el ensayo de estrés hídrico.

Origen	Id	Lugar	Motivo de selección
1	4000	Campo Durán, Salta	Extremo norte de la distribución de <i>P. alba</i> y morfotipo Salteño Norte definido por Verga <i>et al.</i> (2009).
2	4061	La Unión, Salta	Seleccionado por ser parte de una de las zonas climáticas homogéneas definidas en el primer objetivo de este trabajo, a la vez de estar dentro de lo que Verga <i>et al.</i> (2009) definió como el morfotipo Salteño Centro.
3	Punto 6	Parque San Martín, Entre Ríos	Seleccionado por ubicarse en la zona climática homogénea 4, tener uno de los valores de CE más alto de los obtenidos (1,03 ms/cm en el horizonte 3) y ser extremo Este de la distribución Argentina.
4	Punto 21	Belle Bille, Córdoba	Extremo sur de la distribución de <i>P. alba</i> en la Argentina.
5	1428	Villa Giardino, Córdoba	Seleccionado por ser el piso altitudinal superior de la distribución (1.086 msnm).
6	2051	Nueva Esperanza, Santiago del Estero	Seleccionado por encontrarse dentro de la zona climática homogénea 5, dentro de los definido por Verga <i>et al.</i> (2009) como el morfotipo Santiagueño y ser extremo Oeste de la distribución Argentina.
7	Pool (2372, 2382 y 2355)	Este de Chaco	Origen 7) y seleccionados por ser extremo Este de la distribución.
8	Pool (35, 57, 82)	Noroeste de Córdoba	Seleccionados por pertenecer a una zona con precipitaciones inferiores a 550 mm.

Referencia: Id= N° de Identificación utilizado por el BNGP.

Análisis y diseño estadístico. Para estudiar el comportamiento de las semillas de los diferentes orígenes en estrés hídrico se realizó un diseño completamente al azar. Se realizaron análisis de la varianza paramétricos y se efectuaron pruebas complementarias de diferencias mediante test de comparaciones múltiples. Todos los análisis se hicieron con el programa Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2018).

Primer Pre- Ensayo. El experimento se estableció en un diseño factorial completamente al azar, con dos factores: origen (O, con dos orígenes), y sequía: con 7 niveles: el control (0 Mpa) y 6 niveles de sequía (-0,4, -0,8, -1,2, -1,5, -1,9, y -2,2 MPa). El ensayo estuvo compuesto por 6 repeticiones por tratamiento y 10 semillas por repetición. Como control se utilizó agua destilada a concentración osmótica despreciable (sin estrés). Los resultados fueron explorados a través de un diagrama de dispersión de la longitud la raíz

principal de los 2 orígenes en las diferentes fechas de medición, y analizados mediante un ANAVA de longitud de la raíz principal por origen y potencial osmótico.

Segundo Pre- Ensayo. Se estableció un diseño completamente al azar con 6 tratamientos: el testigo (0 MPa) y 5 tratamientos de sequía (-0,4; -0,6; -0,8; 1 y -1,2 MPa). El ensayo se conformó con 4 repeticiones por tratamiento y 10 semillas por repetición. A los 20 días se registraron las SGE₂₀ (%). Se analizó esta variable mediante un análisis de varianza paramétrico y test de comparación de medias (DCG).

Ensayo. Para el análisis de germinación a diferentes potenciales osmóticos (0, -0,8, y -1,2 MPa), temperaturas (20 \leq 30 °C y 10 \leq 35 °C), y 8 orígenes, se sembraron 10 semillas para cada concentración y se efectuaron 4 repeticiones por tratamiento. Se utilizó un diseño experimental factorial completamente aleatorizado, donde se incorporaron no solo los factores ya planteados (temperatura, potencial hídrico y origen), sino también la interacción entre ellos (temperatura por origen, origen por potencial hídrico y potencial hídrico por temperatura).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la variación adaptativa según estrategias de brotación de poblaciones de *P. alba* en ensayo de progenie

Índice de Brotación (IB). El índice de brotación de *Prosopis alba* en Santiago del Estero (IB) para los 16 OGC varió de 1,70 a 3,19 mostrando diferencias significativas ($p < 0,05$) y dio lugar a la formación de 3 grupos de brotación (GB) (Tabla 3), destacándose el GB "temprano"(GBTE) con mayor ($p < 0,05$) valor de IB (3,19), siendo el OGC seleccionado por crecer en sitios con temperaturas mínimas menores a 3,7 °C parte de este grupo. La Tabla 4.4 muestra los tres GB formados y la Figura 4.3 muestra la duración de las fechas de brotación de cada GB.

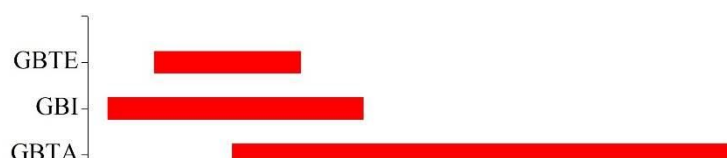


Tabla 4.4. Índice de brotación de *P. alba* en Santiago del Estero (IB) por orígenes geográficos climáticos (OGC).

Orígenes geográficos climáticos	Índice de Brotación	E.E		Grupo de Brotación
T mínima media enero de 3,7 °C	3,19	0,1 6	A	Temprana (1/9-9/9)
Santiago S	2,86	0,1 4	B	
Santiago O	2,79	0,1 5	B	
T máxima media enero de 36 °C	2,67	0,1 5	B	Intermedia (29/8-13/9)
Entre Ríos	2,51	0,1 7	B	
Santiago N	2,48	0,1 5	B	
Chaqueño	2,20	0,1 6	C	
Formosa N	2,19	0,1 5	C	
Elevación mayor a 550 m.s.n.m.	2,12	0,1 9	C	
Chaqueño Sur	2,03	0,1 6	C	
Salteño Centro	2,02	0,1 6	C	Tardía (6/9-7/10)
Precipitación mayor a 1100 mm	1,99	0,1 6	C	
Bermejo- Salta	1,96	0,1 6	C	
Precipitación menor a 550 mm	1,95	0,1 7	C	
Santiago E	1,92	0,1 6	C	
Salteño Norte	1,70	0,1 4	C	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Varios autores registraron distintos momentos de brotación en especies del género *Prosopis* para Argentina. Parizek *et al.* (2000) observaron, estudiando un bosque nativo ubicado en la localidad de Chancaní, provincia de Córdoba (Argentina), que la fenofase de yema hinchada se presentaba en un 75 % de los árboles de *Prosopis flexuosa* y en un 13 % de los árboles en *P. chilensis* el 10 de Septiembre. Al respecto, Ocampo y Orquin (1990) registraron en un bosque nativo de mayor latitud y localizado en Villa Mercedes

de la provincia San Luis, que la fecha en la que se cumple la fenofase de brotación en *P. flexuosa* tiene un inicio el día juliano 294 (21 de Octubre), y un fin el día 311 (7 de Noviembre); iguales registros obtuvieron para *P. caldenia* en esta fenofase. Debandi *et al.* (2019) registraron para dos reservas naturales de *P. flexuosa* en Mendoza (sitios ubicado a mayor longitud que los anteriores) que el crecimiento vegetativo comenzó los primeros días del mes de Octubre, pero el mayor porcentaje de individuos en el estadio de brotación lo encontraron a mediados de Octubre. Carnelos *et al.* (2020), quienes realizaron un seguimiento fenológico de 12 especies forestales ornamentales (nativas y exóticas) en la provincia de Buenos Aires en el 2016, sostienen que en la mayoría de las plantas se adelantó la fecha de brotación, además de que muchas redujeron la duración de la fase cuando se las compara con los registros históricos de los últimos 60 años, debido a las modificaciones de las condiciones ambientales, considerando variables como horas de frío, temperatura mínima y máxima diarias, y temperaturas medias mensuales de cada año.

Para este estudio se separaron los inicios y fines de brotación según GB, siendo: inicios el 01/09, 29/08 y 06/09, y finales 09/09, 13/09 y 7/10 de los GB temprana (GBTE), intermedia (GBI) y tardía (GBTA) respectivamente. Puede observarse que *P. alba* en Santiago del Estero presenta su brotación en época similar a *P. chilensis* en Chancaní, Córdoba; que se localiza a 1° de longitud de distancia de Santiago del Estero y se adelanta a la brotación de *P. flexuosa* y *P. caldenia* en San Luis que se separan principalmente por estar ubicados a latitudes muy disímiles a los de Santiago del Estero. La duración de la fenofase de brotación fue de 9 días para el GBTE, 16 días para el GBI y de 32 días para el GBTA. Se observa que los GB formados mostraron una estructura espacial tal como se muestra en la Figura 4.4, donde el OGC con mayor valor de IB (GBTE) se ubica en el límite sur de Santiago del Estero con Córdoba, los OGC con mediano valor de IB (GBI) en la región centro de la distribución, mientras que los OGC con menor valor de IB (GBTA) lo hicieron en la región norte y este. Sin embargo, no hubo autocorrelación espacial del IB (IM=0,02 - p>0,05).

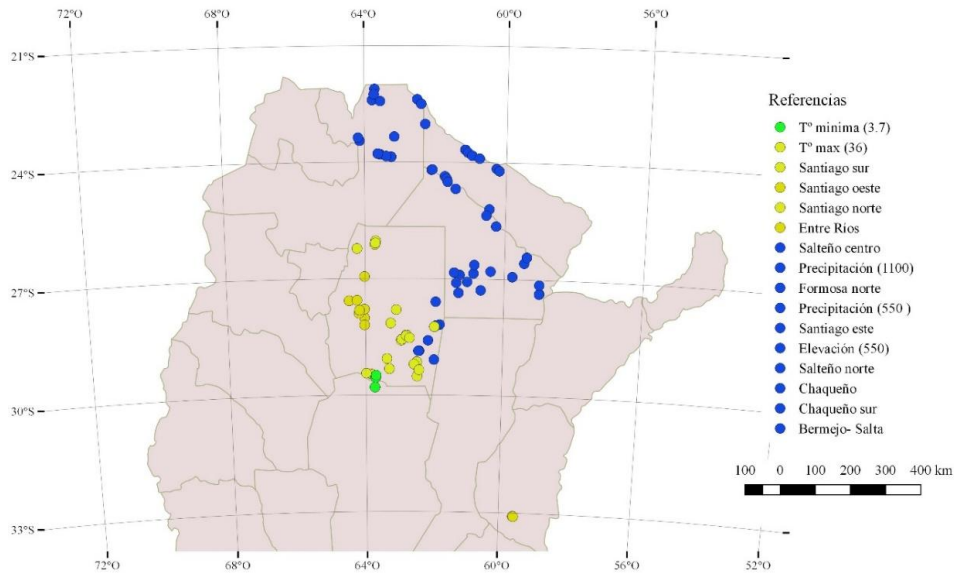


Figura 4.4. Distribución geográfica de los grupos de brotación formados (GB). En verde el grupo de brotación temprana (GBTE), en amarillo el grupo de brotación intermedia (GBI), y en azul el grupo de brotación tardío (GBTa).

Carranza *et al.* (2000) obtuvieron, en el ensayo genecológico de 17 poblaciones de *P. chilensis* de Argentina y 6 de Chile, los mayores Índices de Brotación (mayor a 40) para todas las poblaciones de Chile y las poblaciones argentinas procedentes de la provincia de Catamarca y oeste de Córdoba. Sus resultados son similares a los de este trabajo en tanto que ambos presentaron una estructura espacial, que distingue por IB, el origen geográfico del material utilizado en el ensayo. Si bien las zonas de recolección de Carranza *et al.* (2000) y la del presente trabajo son diferentes, así como también las especies (*P. chilensis* vs. *P. alba*) en ambos casos y para Argentina, los materiales que presentaron IB más altos fueron el de las poblaciones originarias del oeste y norte de Córdoba.

En cuanto al análisis de componentes principales de 7 variables geográficas climáticas, se observa en la Figura 4.5 que este quedó definido por dos componentes principales que explican el 100 % de la variación observada. Así la componente principal 1 (CP1) explicó un 77,70 % de la variación con una mayor contribución de las variables elevación, latitud, longitud, TMF y TMA, mientras que la contribución de la componente principal 2 (CP2) representó un 22,3 % siendo las variables Precipitación y TMC las más relevantes. En la Figura 4.5 se observa que la CP1 separa los tres OGE. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Carranza *et al* (2000) para *P.*

chilensis que obtuvieron una relación inversa entre el IB con la latitud y longitud; y una relación positiva, significativa, entre el IB y la elevación.

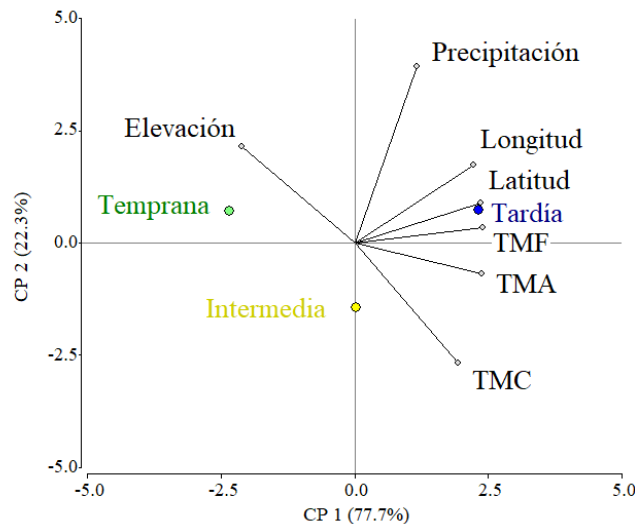


Figura 4.5. Ordenamiento bidimensional de los GB en función de las variables geográficas- climáticas.

El resultado de los ANAVAs, indicó que las poblaciones que integran los GB difirieron significativamente en algunas de las variables climáticas ($p < 0,05$) (Tabla 4). Se destacaron dos variables que lograron separar los tres GB: TMA y TMF. Estos resultados muestran que si bien todas las variables que integran el CP1 (altitud, latitud, longitud, TMF y TMA) fueron importantes en la definición de los 3 GB, las variables TMA y TMF fueron las únicas que contribuyeron a diferenciar ($p < 0,05$) entre los tres GB, mientras que la TMC separó el GBTE de los restantes GB, al poseer este grupo el menor valor ($p < 0,05$) (Tabla 4.5).

Diversos autores obtuvieron resultados similares a los encontrados: Menzel (2003) sostiene que es conocido que existe una fuerte respuesta de las fases fenológicas a la temperatura del aire, principalmente las que ocurren durante la primavera. Ocampo y Orquin (1990), Murphy *et al.* (1999) y Garau *et al.* (2008) registraron relaciones entre las temperaturas medias y el comienzo y la duración de la fase brotación en especies nativas y exóticas, en las cuales la temperatura mostró una relación directa con el comienzo de la fase, e inversa con la duración. Carnelos *et al.* (2020) sostienen que el adelanto en el inicio de la fase de brotación observada fue producto del incremento de la temperatura mínima (0,03 °C por año) registrado desde 1950 al 2018. En el presente

trabajo el grupo de brotación temprano fue el grupo que en el ACP mostró una relación inversa con las variables de temperaturas, y si bien su inicio de brotación es diferencial con respecto a los otros grupos (Figura 4.3) culmina primero la fase de brotación. El GBTE además se diferencia para las variables de temperaturas con los restantes grupos como lo muestra la Tabla 4, afirmando el resultado obtenido por Carnelos *et al.* (2020) quien encontró una disminución del tiempo en que ocurre la fase de brotación

Tabla 4.5. Características geográfico-climáticas de los grupos de brotación (GB).

GB	TM A (°C)	TM F (°C)	TM C (°C)	Elevación (m.s.n.m.)	Precipitación (mm)	Longitud (grados)	Latitud (grados)
Temprana	17,80 C	3,36 C	31,63 B	556 A	761 A	-63,71 B	-29,61 B
EE	0,584	0,675	0,661	75,27	95,22	0,77	1,10
Intermedia	20,48 B	5,76 B	34,90 A	191 B	670 B	-63,44 B	-28,22 B
EE	0,171	0,198	0,193	22,04	27,88	0,23	0,32
Tardía	21,95 A	8,79 A	34,47 A	181 B	848 A	-61,69 A	-25,53 A
EE	0,128	0,148	0,145	16,56	20,95	0,17	0,24

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Brotación en el tiempo. Los parámetros estimados de la función logística que describe el porcentaje de brotación en función del tiempo tanto para el conjunto de los individuos evaluados como para cada uno de los grupos de brotación formados se muestran en la Tabla 4.6, donde se observan 3 funciones específicas de acuerdo al comportamiento de cada uno de los GB: GBTE, GBI y GBTA.

Tabla 4.6. Modelos de porcentaje de brotación en función del tiempo.

Comportamiento medio	Grupo de Brotación	BLUPS u_i	v_i	Comportamiento específico
	GBTE	-5,29	0,05	$B(t)_i = \frac{1}{1+e^{\frac{-(t-(10,7))}{4,09}}}$
$B(t)_i = \frac{1}{1+e^{\frac{-(t-(15,99+u_i))}{4,04+v_i}}}$	GBI	0,22	0,62	$B(t)_i = \frac{1}{1+e^{\frac{-(t-(16,21))}{4,66}}}$

GBTA 5,07 -0,6
7

$$B(t)_i = \frac{1}{1+e^{\frac{-(t-21,06)}{3,37}}}$$

La Figura 4.6 muestra las curvas de brotación construidas para cada grupo y que responden a las funciones descritas en la Tabla 5, así como también el comportamiento medio de los grupos de brotación, que posee un comportamiento similar al GBI.

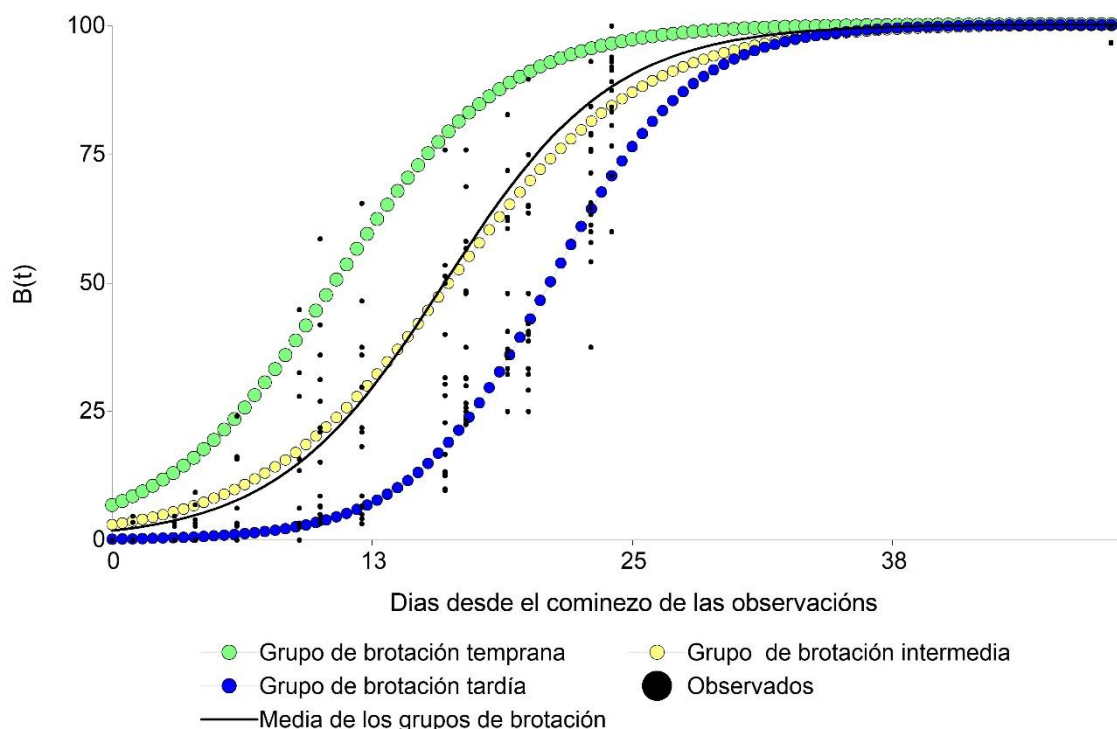


Figura 4.6. Brotación (%) en función del tiempo para los diferentes GB con diferentes IB.

Velocidad media de crecimiento de los brotes (VMCB). No se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) de la longitud del brote según las tres clases diamétricas. Tampoco respecto a la orientación de los brotes marcados (norte, sur, este y oeste), por lo que para el cálculo de la velocidad media de crecimiento no se tuvieron en cuenta.

La velocidad media de crecimiento de los brotes tuvo un comportamiento diferencial según OGC ($p < 0,05$) dando lugar a la formación de dos grupos, unos de mayor velocidad y otro de menor velocidad (Tabla 4.7), denominados en este estudio

GVMCBRa (rápido) y GVMCBLe (lento). Este resultado que evidencia distintas estrategias de brotación, no es coincidente con lo reportado por Carranza *et al.* (2000) trabajando en el ensayo genecológico de *P. chilensis (ut supra)*, ya que no encontraron diferencias entre los crecimientos de brotes de las distintas procedencias, resultado atribuido en el estudio a una excesiva variabilidad intrapoblacional de la especie

Tabla 4.7. Velocidades medias de crecimiento (VMC) de los brotes por orígenes geográficos climáticos

Orígenes geográficos climáticos	VMCB (cm/día)	E.E.	Grupo de VMCB
Salteño centro	0,44	0,05	A
Chaqueño sur	0,44	0,03	A
Bermejo- salta	0,44	0,05	A
Chaqueño	0,40	0,03	A
Formosa norte	0,37	0,04	B
T° max (36)	0,37	0,03	B
Precipitación (1100)	0,36	0,03	B
Precipitación (550)	0,34	0,04	B
Santiago sur	0,34	0,03	B
Elevación (550)	0,34	0,02	B
Santiago oeste	0,34	0,03	B
T° mínima (3,7)	0,33	0,02	B
Santiago este	0,33	0,03	B
Salteño norte	0,31	0,05	B
Entre Ríos	0,28	0,03	B
Santiago norte	0,28	0,03	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Con respecto al crecimiento de los brotes de *Prosopis*, Sharif *et al.* (1983) lo describen como rápido, pero de corta duración, y puntualmente analiza el comportamiento de *P. glandulosa* Torr. en California para dos temporadas de crecimiento, en la primera, de febrero a noviembre de 1980 registraron un crecimiento medio de los brotes de 23,4 cm mientras que en la segunda temporada, de julio a diciembre, el crecimiento fue de 25,8 cm, lo que sería igual a un crecimiento diario de 0,078 y 0,14 cm/ día respectivamente, valores más bajos que los obtenidos en Santiago del Estero para *P. alba* (crecimiento mínimo= 0,28 cm/ día, crecimiento máximo= 0,44 cm/ día).

Los dos grupos formados mostraron un ordenamiento espacial, tal como se muestra en la Figura 4.7, donde se observa que los orígenes Salteño centro, Chaqueño sur, Bermejo-salta y Chaqueño se agrupan en el centro de las familias analizadas, y las restantes 12 familias se ubican rodeando a estas. Sin embargo, no se observó una autocorrelación espacial de la velocidad media de crecimiento de los brotes ($IM=0,11$ - $p<0,05$).

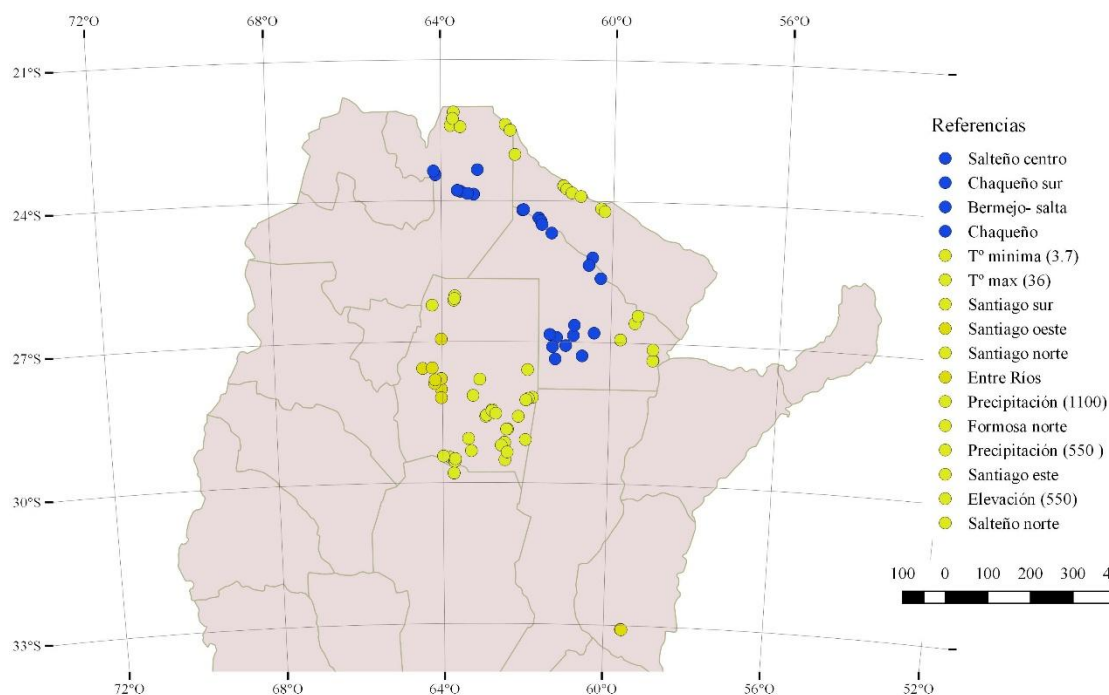


Figura 4.7. Distribución geográfica de los grupos formados para velocidad media de crecimiento de los brotes. En azul GVMCBRa y en amarillo el GVMCBLe.

Las variables que registraron una diferencia entre grupos de velocidad media de crecimiento de los brotes rápida y grupo de velocidad media de crecimiento de los brotes lento fueron T° media anual, T° mínima media del mes más frío y Latitud, confirmados por un ANAVA ($p<0,05$) y test de comparación de medias DCG (Tabla 4.8).

Tabla 4.8. Características geográfico- climáticas de los grupos de velocidad media de crecimiento de los brotes (VMCB).

Grupo de VMCB*	TMA** (°C)	TMF** (°C)	TMC** (°C)	Elevación (m.s.n.m.)	Precipitación (mm)	Longitud (grados)	Latitud (grados)
GVMCBRa	22,30 A	9,03 A	34,79 A	207,59 A	834,43 A	-61,88 A	-25,21 A

EE	2,37	3,28	2,26	17,15	32,15	0,27	0,43
GVMCBL e	20,90 B	7,03 B	34,41 A	166,03 A	768,13 A	-62,51 A	-27,12 B
EE	1,55	2,15	1,48	26,19	21,04	0,18	0,28

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$). *GVMCBRa: grupos de velocidad media de crecimiento de los brotes rápida y GVMCBL e: grupo de velocidad media de crecimiento de los brotes lento **TMA: T° media anual, TMF: T° mínima media del mes más frío y TMC: T° máxima media del mes más caliente*

Sharifi *et al.* (1983) realizan correlaciones entre variables ambientales de las dos temporadas de crecimiento y el evento fenológico descripto (crecimiento de los brotes), para lo cual describen que el primer crecimiento se produjo durante bajas temperaturas (máxima 20 °C), y alta humedad de suelo (9 %), y el segundo crecimiento se produjo con altas temperaturas (máxima 45 °C) y baja humedad de suelo (5 %). Los resultados de Sharif *et al.* (1983) mostraron que las correlaciones entre estas dos variables fueron mínimas, aunque relaciona el mayor crecimiento de la segunda temporada a las altas temperaturas que hubo en ese período.

Análisis integral de las variables estudiadas. Es de destacar que hubo un comportamiento diferencial de las 88 familias de polinización abierta al observar el IB y la VMCB. Tal como se muestra en la Figura 4.8, hubo un grupo de familias que brotaron primero (IB temprana) pero con VMCB lenta como el OGC T° mínima 3.7, otro grupo que presentó brotación tardía (IB tardía) pero con VMCB rápidas como los OGC Bermejo Salta, Salteño centro, Chaqueño y Chaqueño sur, un tercer grupo que presentaron un IB intermedio y VMCB lenta como lo son los OGC Santiago norte, Santiago sur, Santiago oeste, Entre Ríos, T° máxima 36; y un cuarto grupo que presentó IB tardío y VMCB lenta conformada por los orígenes Salteño norte, Formosa N, Elevación (550), Precipitación (1100), Precipitación (550) y Santiago este. No se encontraron estrategias de brotación conformadas por IB intermedio con VMCB rápidas, ni por IB temprana con VMCB rápidas. Estos patrones pueden interpretarse como una variación adaptativa que las poblaciones de *P. alba* tienen en función de los sitios geográficos donde fueron recolectadas.

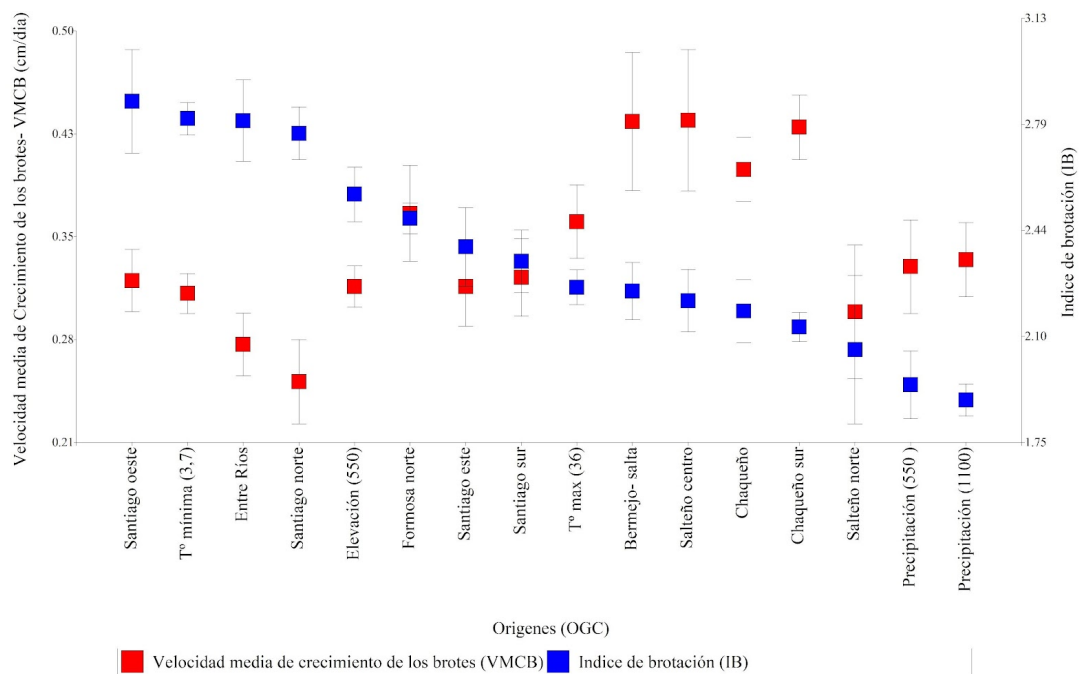


Figura. 4.8. Diagrama de dispersión de índice de brotación y velocidad media de crecimiento de los brotes en función de los orígenes geográficos climáticos.

Los GB (temprana, intermedia y tardía) y los grupos de VMCB (rápida y lenta) presentaron una distribución espacial diferente. Las variables asociadas a esa diferenciación para ambos casos fueron las TMA y TMF. Esta coincidencia podría estar influenciando el comportamiento diferencial en 4 grupos de estrategias de brotación. Puede observarse la distribución espacial de las cuatro estrategias de brotación en la Figura 4.9.

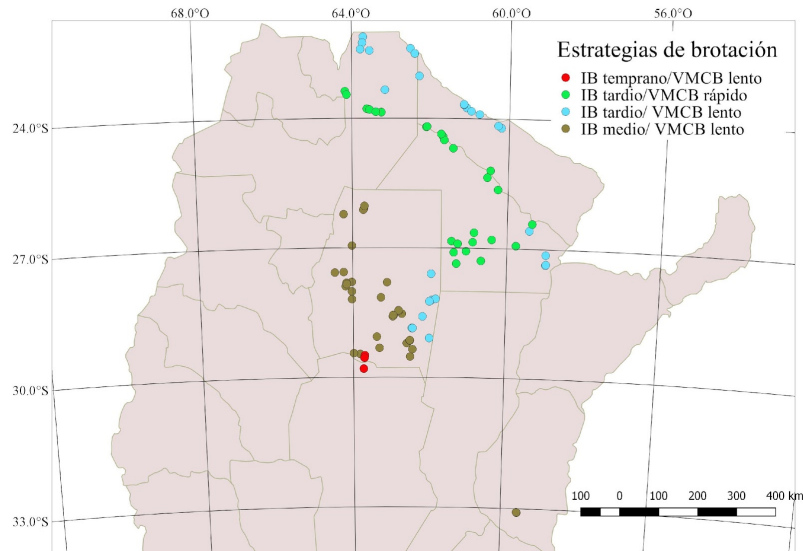


Figura. 4.9. Distribución espacial de los cuatro grupos de estrategias de brotación. IB temprano/VMCB lenta, IB tardío/VMCB rápido, IB tardío/VMCB lento, IB medio/VMCB lento.

Análisis de la variación adaptativa de poblaciones de *P. alba* en ensayo de estrés hídrico a nivel de semilla

Primer Pre- ensayo. La Figura 4.11 presenta el diagrama de dispersión de la longitud de la raíz principal (mm) de los 2 ecotipos del BNGP estudiados en las diferentes fechas de conteo. Analizando los orígenes, se observa que el origen BNGP N° 4472 (Villa María) comenzó antes su germinación que el origen BNGP N° 4000 (Campo Durán), aunque éste creció a un ritmo más rápido, superando al origen Villa María al finalizar el pre- ensayo a los 14 días, sin embargo esta diferencia no fue significativa ($p > 0,05$).

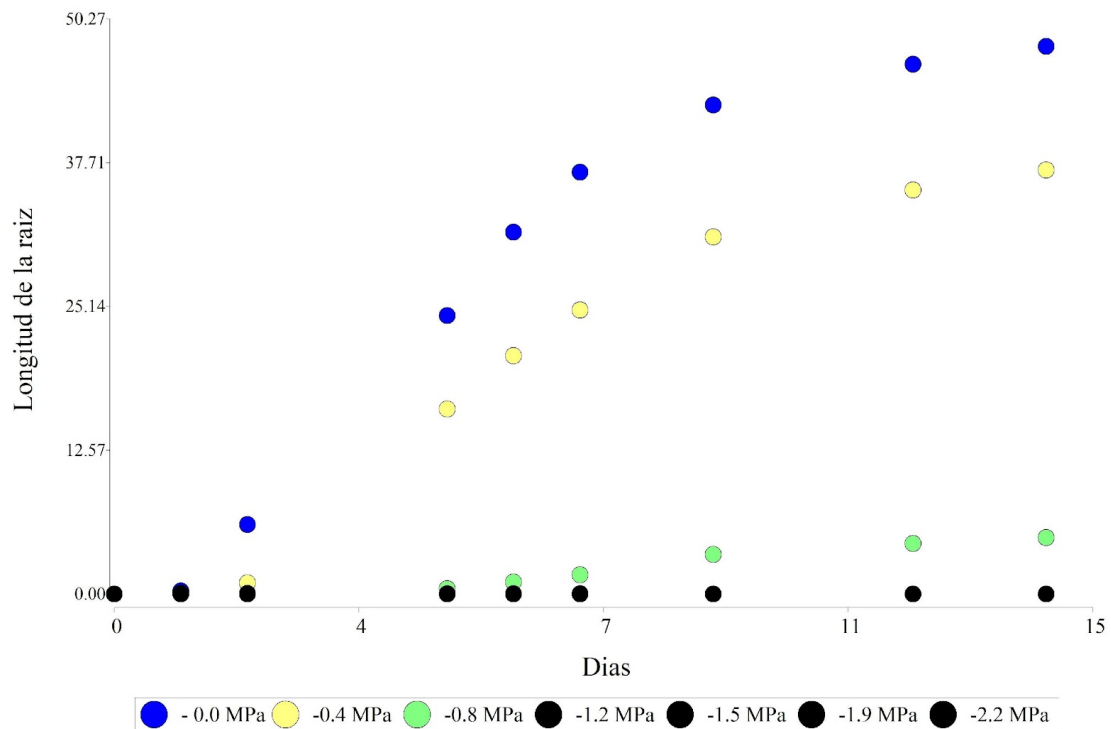


Figura 4.11. Evolución de la longitud de la raíz principal (mm) en función del tiempo según de los tratamientos del primer pre-ensayo.

Las valores de germinación a los 14 días fueron mayores ($p < 0,05$) en el tratamiento testigo y similares en los tratamientos -0.4, -0,8 y -1,2 MPa. Se observa que las semillas germinaron hasta en el tercer tratamiento planteado (-1,2 MPa) (Figura 4.13)

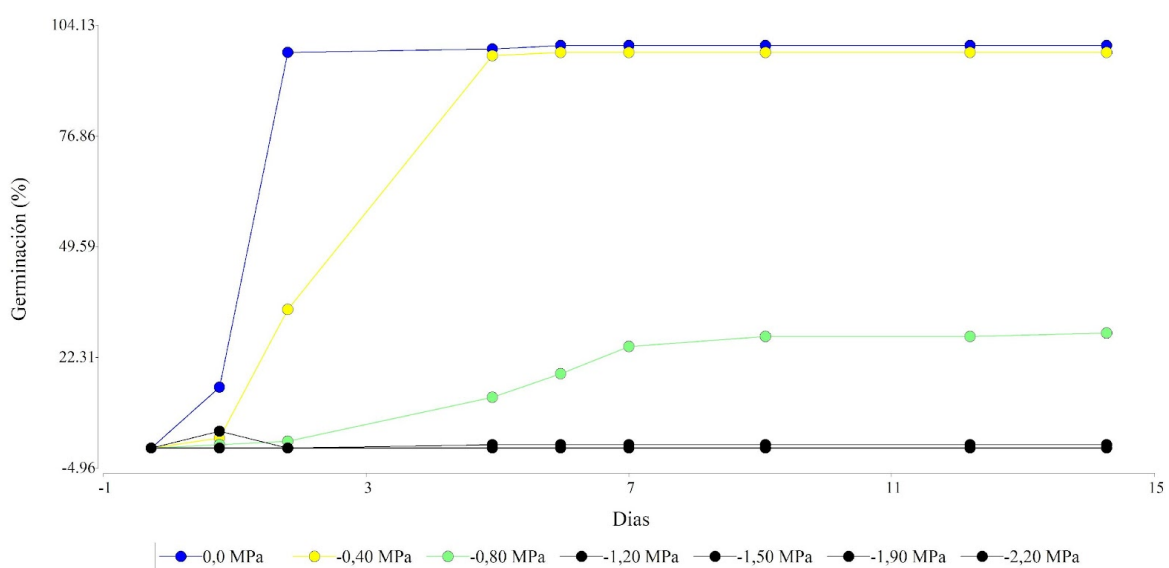


Figura 4.12. Evolución de la germinación (%) en función del tiempo según los tratamientos del primer pre-ensayo.

Como puede observarse en la Figura 4.13 para potenciales osmóticos menores a -1,5 MPa no se observaron semillas germinadas, por lo cual se planteó un segundo pre ensayo sin tener en cuenta estos niveles.

El cambio de sustrato salino para las semillas que no germinaron por agua durante 7 días posteriores a los 14 días del ensayo mostraron que las semillas soportaron los potenciales osmóticos y fueron capaces de germinar logrando altos PG: 100 % para el T -0,8, 96 % para el T -1,2, 96 % para el T -1,5 y 88 % para el T -2.2 MPa. Todos estos, valores comprendidos en la categoría de “alta calidad” según el ranking establecido por De La Fuente *et al.* (2011).

Segundo Pre-ensayo. Los resultados de la Tabla 4.9 muestran que hubo diferencias significativas ($p < 0,05$) en el porcentaje de semillas germinadas a los 20 días desde la siembra colocadas a diferentes potenciales osmóticos. Se identificó la presencias de dos grupos, uno formado por los tratamientos que se asemejaron al testigo (0 MPa): -0,4, -0,6 y -0,8 MPa y el otro conformado por los tratamientos de menor potencial osmótico (-1 y -1,2 MPa).

Tabla 4.9. Semillas germinadas (%) a los 20 días desde la siembra según potencial hídrico.

Potencial Hídrico (MPa)	Semillas germinadas a los 20 días (%)
0,0	87,88 B
-0,4	83,46 B
-0,6	79,23 B
-0,8	66,92 B
-1,0	19,04 A
-1,2	9,42 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Los resultados obtenidos con el cambio de sustrato salino por agua destilada en los tratamientos que menor cantidad de semillas germinadas obtuvieron, mostraron que las semillas soportaron los potenciales osmóticos y fueron capaces de germinar logrando valores de germinación del 100 % para el T -0,8 MPa, 75 % para el T -1 MPa, y del 45 % para el T -1,2 MPa. Estos últimos valores estarían denotando una cierto

grado de deterioro en la semillas, dado que valores inferiores a 80 (%) son considerados de menor calidad (Joseau, 2005; De La Fuente *et al.*, 2011). Por otro se encontró un comportamiento similar en cuanto a germinación hasta un potencial osmótico de -1 MPa, a diferencia de lo observado en este ensayo (a los 20 días) donde el cambio ocurre a -0,8 MPa.

Ensayo

Germinación de semillas (%). Para la variable SGE_{21} se observó interacción ($p < 0,05$) entre los factores temperatura, origen y potencial osmótico, tanto a nivel de los tres factores como a nivel de dos factores (temperatura por origen, origen por potencial osmótico, y potencial osmótico por temperatura).

Existen diferencias significativas en las SGE_{21} (%) entre las temperaturas $20 \leq 30$ °C y $10 \leq 35$ °C ($p < 0,05$) a los 21 días, presentando la temperatura $20 \leq 30$ °C mejores valores de germinación. Igual temperatura fue recomendada por Catalán y Balzarini (1992), quienes al categorizar la germinación de semillas de especies del género *Prosopis* resaltan el parecido tecnológico en el proceso germinativo y el desarrollo de las plántulas en el tiempo de especies de este género con *Robinia pseudoacacia* L., especie que posee especificaciones para germinación descritas en las reglas (ISTA, 2016). Los resultados también indican que existen diferencias significativas en el porcentaje de SGE_{21} entre los potenciales osmóticos 0, -0,8 y -1,2 MPa, siendo menores a medida que el potencial disminuye; resultados coincidentes con los encontrados por varios autores (Bazzaz, 1973; Arce y Balboa, 1988; Catalán *et al.*, 1993; Perez y Tambelini, 1995; Cony y Trione, 1998; Passera, 2000; Ojeda-Silvera *et al.*, 2015).

Se observa además que existen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los orígenes de estudio. La Tabla 4.10 muestra que el origen que presentó mejores porcentajes de SG_{21} fue el 8 (pool noroeste de Córdoba) que, de forma coincidente, es el seleccionado por ser la zona de menor precipitación en la distribución de *Prosopis*. Lógica similar describe Marcó *et al.* (2016) quienes encontraron al origen “Santiagueño” con mejor comportamiento en la variable crecimiento en altura entre los ecotipos de su ensayo, distribuido naturalmente en áreas ecológicas xéricas. Marcó *et al.* (2016) señalan que debido a esto tiene la capacidad de realizar un ajuste osmótico más

fuerte y de disminuir el daño oxidativo, mostrando una mejor tolerancia al estrés hídrico.

Tabla 4.10. Semillas germinadas a los 21 días de los orígenes de *P. alba* ensayados.

Sitio	Origen n	Semillas germinadas a los 21 días (%)
Campo Durán, Salta	1	42,92 C
La Unión, Salta	2	37,50 D
Parque San Martín, Entre Ríos	3	37,50 D
Bell Ville, Córdoba	4	45,42 B
Villa Giardino, Córdoba	5	33,33 E
Nueva Esperanza, Santiago del Estero	6	45,00 B
Este de Chaco	7	31,25 F
Noroeste de Córdoba	8	55,83 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

El mejor comportamiento en semillas germinadas, expresadas en porcentaje, se obtuvo en el origen 4 (Bell Ville- Córdoba) a la temperatura 20<=>30 °C y para el origen 8 (pool noroeste de Córdoba) en ambas temperaturas (Tabla 4.11), seguidos del origen 6 (Nueva Esperanza- Santiago del Estero) a la temperatura 20<=>30 °C.

Tabla 4.11. Semillas germinadas a los 21 días (%) según temperaturas de germinación y origen.

Temperaturas ° C	Origen	Semillas germinadas a los 21 días (%)
10<=>35	Campo Durán, Salta	40,83 E
	La Unión, Salta	36,67 G
	Parque San Mrtín, Entre Ríos	32,50 I
	Bell Ville, Córdoba	33,33 I
	Villa Giardino, Córdoba	31,67 J
	Nueva Esperanza, Santiago del Estero	37,50 F
	Este de Chaco	28,33 K
	Noroeste de Córdoba	55,83 A
20<=>30	Campo Durán, Salta	45,00 C
	La Unión, Salta	38,33 F
	Parque San Mrtín, Entre Ríos	42,50 D
	Bell Ville, Córdoba	57,50 A

Villa Giardino, Córdoba	35,00 H
Nueva Esperanza, Santiago del Estero	52,50 B
Este de Chaco	34,17 H
Noroeste de Córdoba	55,83 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Estos resultados obtenidos en esta tesis no concuerdan con el supuesto de Venier *et al.* (2015) quienes sostienen que diferentes orígenes dentro de una misma especie tendrán una variación en los requerimientos climáticos. Esta diferencia puede deberse a una preferencia general de *P. alba* por la alternancia de la temperatura $20 \leq 30$ para la germinación, o debido a que las variaciones entre las dos temperaturas utilizadas son tan grandes que no logran captar la variación en los requerimientos climáticos planteados por Venier *et al.* (2015).

Existe interacción entre los factores temperatura y potencial osmótico, tal como también lo destaca Cony y Trione (1998). En esta interacción los mayores porcentajes de SG₂₁ a los 21 días se obtuvieron en los tratamientos testigos, sin importar la temperatura, seguidos de los potenciales osmóticos de -0,8 MPa donde se diferenciaron significativamente ($p < 0,05$) por temperatura, obteniendo mejores resultados para la temperatura $20 \leq 30$ °C (Tabla 4.12). Al respecto tanto Cony y Trione (1998) como Passera (2000) resaltan que existe mayor necesidad de agua por parte de la semillas en la medida que las temperaturas sean sub-óptimas

Tabla 4.12. Semillas germinadas a los 21 días(%) según temperatura y potencial osmótico.

Temperaturas ° C	Potencial Osmótico (MPa)	Semillas germinadas a los 21 días (%)
10\leq35	0	93,13 A
20\leq30	0	92,81 A
20 \leq 30	-0,8	39,38 B
10 \leq 35	-0,8	17,19 C
20 \leq 30	-1,2	3,13 D
10 \leq 35	-1,2	0,94 D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Si se analiza la interacción potencial osmótico- origen se observa en la Tabla 4.13 que hubo diferencias significativas ($p < 0,05$). Si bien los potenciales osmóticos testigos (0 MPa) tuvieron mejores valores de porcentaje de SGE₂₁, seguidos de todos los potenciales osmóticos -0,8 MPa, y seguidos de los potenciales -1,2 MPa, se obtuvo interacción entre los factores y dentro de los diferentes potenciales osmóticos se mostraron diferencias significativas ($p < 0,05$) en la variable respuesta de SGE₂₁, expresada en porcentaje. Las mejores respuestas teniendo en cuenta estos dos factores se obtuvieron con el origen 6 (Nueva Esperanza- Santiago del Estero) con un potencial osmótico de 0 MPa (Tabla 4.15), seguido de los orígenes 3 (Parque San Martín- Entre Ríos), 4 (Belle Bille- Córdoba) y 8 (Pool noroeste de Córdoba) para potencial osmótico testigo (0 MPa).

Tabla 4.13. Semillas germinadas a los 21 días (%) según potencial osmótico y origen.

Potencial Osmótico (MPa)	Origen	Semillas germinadas a los 21 días (%)
-1,2	Campo Durán, Salta	5,00 J
	La Unión, Salta	2,50 J
	Parque San Martín, Entre Ríos	0,00 J
	Bell Ville, Córdoba	3,75 J
	Villa Giardino, Córdoba	1,25 J
	Nueva Esperanza, Santiago del Estero	1,25 J
	Este de Chaco	1,25 J
	Noroeste de Córdoba	1,25 J
-0,8	Campo Durán, Salta	31,25 G
	La Unión, Salta	17,50 H
	Parque San Martín, Entre Ríos	16,25 H
	Bell Ville, Córdoba	35,00 G
	Villa Giardino, Córdoba	10,00 I
	Nueva Esperanza, Santiago del Estero	33,75 G
	Este de Chaco	10,00 I
	Noroeste de Córdoba	72,50 F
0	Campo Durán, Salta	92,50 C
	La Unión, Salta	92,50 C
	Parque San Martín, Entre Ríos	96,25 B
	Bell Ville, Córdoba	97,50 B
	Villa Giardino, Córdoba	88,75 D
	Nueva Esperanza, Santiago del Estero	100,00 A

Este de Chaco	82,50 E
Noroeste de Córdoba	93,75 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Las tendencias observadas en el presente estudio, en donde los orígenes que se destacan al analizar las diferentes interacciones fueron los mismos (Nueva Esperanza y Noroeste de Córdoba), indican que tal como lo afirma Ojeda-Silvera *et al.* (2015) la variable semillas germinadas (%) es altamente dependiente de las condiciones en las que se desarrolló el experimento. Por tal motivo la variable resulta útil al momento de clasificar variedades u orígenes como potencialmente tolerantes al estrés por sequía. Al respecto, Aparecida Delachiave y Zambello de Pinho (2003) indican que uno de los métodos más difundidos para determinar la tolerancia de las plantas al estrés hídrico es la observación de la capacidad de germinar y emerger que posee las semillas en condiciones de sequía simulada, ya que esto limita la absorción de agua y puede retardar y/o afectar los diferentes procesos fisiológicos (Fanti y Andrade Perez, 2004).

Longitud de la raíz principal. Los resultados fueron significativos ($p < 0,05$) para los factores origen y potencial osmótico, así como también para las interacciones temperatura y origen; origen y potencial osmótico; y temperatura y potencial osmótico.

El origen 8 (Pool noroeste de Córdoba) obtuvo los mayores valores ($p < 0,05$) de LR₂₁ (5,85 cm), seguido del origen 5 (Villa Giardino, Córdoba) como lo muestra la Tabla 4.14. Puede observarse que lo planteado por Marcó *et al.* (2016) se sostiene para la variable longitud de la raíz principal.

Tabla 4.14. Longitud de la raíz principal (cm) por origen de plántulas normales a los 21 días.

Origen	Longitud de la raíz principal (cm)
Noroeste de Córdoba	5,85 A
Villa Giardino, Córdoba	5,50 B
Nueva Esperanza, Santiago del Estero	4,92 C
Bell Ville, Córdoba	4,73 D
Parque San Martín, Entre Ríos	4,61 E

La Unión, Salta	4,01 F
Campo Durán, Salta	3,29 G
Este de Chaco	2,90 H

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Los resultados muestran que el origen geográfico de la semilla ejerció un control genético sobre los caracteres de comportamiento de las plantas entre los que destaca la longitud de la raíz, tal como lo afirma Fontana y Luna (2015).

Diferente a lo encontrado en SGE₂₁ en la interacción de temperatura con origen, las longitudes de la raíces principales que fueron más largas ($p < 0,05$) se obtuvieron en la temperatura 10 \leq 35 °C (Tabla 4.15).

Tabla 4.15. Longitud de la raíz principal de plántulas normales a los 21 días (cm) por origen y temperatura.

Temperatura (° C)	Origen	Longitud de la raíz principal (cm)
10 \leq 35	Campo Durán, Salta	3,19 J
	La Unión, Salta	3,74 H
	Parque San Martín, Entre Ríos	4,64 E
	Bell Ville, Córdoba	4,93 D
	Villa Giardino, Córdoba	6,82 A
	Nueva Esperanza, Santiago del Estero	5,70 C
	Este de Chaco	4,98 D
	Noroeste de Córdoba	5,90 B
20 \leq 30	Campo Durán, Salta	3,39 I
	La Unión, Salta	4,29 G
	Parque San Martín, Entre Ríos	4,58 E
	Bell Ville, Córdoba	4,59 E
	Villa Giardino, Córdoba	4,62 E
	Nueva Esperanza, Santiago del Estero	4,41 F
	Este de Chaco	1,50 K
	Noroeste de Córdoba	5,79 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Las diferencias entre la interacción temperatura por potencial osmótico también fue significativa, presentando mayor LR₂₁ ($p < 0,05$), los tratamientos de potencial osmótico testigo, seguido del tratamiento -0,8 MPa y con LR₂₁ menores ($p < 0,05$), el tratamiento de -1,2 MPa. Se destaca que en el tratamiento 0 y -1,2 MPa la temperatura 20 \leq 30 °C presentó mayores LR₂₁, pero en el tratamiento -0,8 MPa, la temperatura 10 \leq 35 °C presentó una LR₂₁ significativamente mayor ($p < 0,05$).

En los resultados de la interacción entre los factores potencial osmótico y origen se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$). Se observa que los orígenes 5 (Villa Giardino, Córdoba) y 8 (Pool noroeste de Córdoba) del tratamiento potencial osmótico -0,8 MPa con un comportamiento similar al de todos los orígenes de potencial osmótico testigo (mayores LR₂₁). Como orígenes que tuvieron plántulas con mayor LR₂₁, en el tratamiento -1,2 MPa, se encontró al 8 (Tabla 4.16). Estos resultados afirman lo expresando por De Santa Olalla Mañas y Calera Belmonte (2005), quienes sostienen que la disponibilidad hídrica puede afectar prácticamente a todas las variables morfo-métricas, y que la magnitud de la variación es dependiente de la especie- cultivar u origen y del grado de tolerancia, pero que depende también de la magnitud de la falta de agua y de la rapidez con que se experimente su carencia.

Tabla 4.16. Longitud de la raíz principal de plántulas normales de 21 días (cm) por potencial osmótico y origen.

Potencial Osmótico (MPa)	Origen	Longitud de la raíz principal (cm)
-1,2	Campo Durán, Salta	0,85 E
	La Unión, Salta	1,85 D
	Parque San Martín, Entre Ríos	1,60 D
	Bell Ville, Córdoba	4,30 C
	Villa Giardino, Córdoba	1,40 D
	Nueva Esperanza, Santiago del Estero	0,30 E
	Este de Chaco	4,60 C
	Campo Durán, Salta	2,15 D
	La Unión, Salta	3,66 D
-0,8	Parque San Martín, Entre Ríos	3,46 D
	Bell Ville, Córdoba	4,08 D
	Villa Giardino, Córdoba	6,21 A
	Nueva Esperanza, Santiago del Estero	4,39 C
	Este de Chaco	3,15 D
	Noroeste de Córdoba	5,95 A
	Campo Durán, Salta	6,87 A
	La Unión, Salta	6,53 A
	Parque San Martín, Entre Ríos	5,77 A
0	Bell Ville, Córdoba	6,94 A
	Villa Giardino, Córdoba	5,39 B
	Nueva Esperanza, Santiago del Estero	7,21 A
	Este de Chaco	3,94 D
	Noroeste de Córdoba	6,38 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Según Blum (2005), la raíz puede incrementar su longitud ante restricciones moderadas (-0,75 MPa) de disponibilidad hídrica del sustrato, característica que se observa en el origen 5 y potencial osmótico medio (-0,8 MPa) planteado en el ensayo.

Según Blum (2005) esta respuesta biológica inducida por el estrés le permite a la planta una mayor zona de exploración en el suelo en busca del agua para desarrollar sus procesos fisiológicos de forma eficiente, siendo éste un elemento a tomar en cuenta para la selección de variedades tolerantes al estrés hídrico.

Cambio de Potencial osmótico -0,8 o -1,2 a 0 MPa. Los resultados mostraron diferencias significativas ($p < 0,05$) para todas los factores introducidos en el análisis (temperatura, origen, potencial osmótico, temperatura por origen, origen por potencial osmótico, y potencial osmótico por temperatura).

Los mejores valores en porcentajes de plántulas normales a los 28 días ($p < 0,05$) se obtuvieron en la temperatura 10-35 ° C. Para el caso del factor potencial osmótico, los mejores valores se obtuvieron en -1,2 MPa, y para el factor origen los mejores porcentajes se obtuvieron para el sitio 6 (Nueva Esperanza). Puede observarse que se obtiene una mejor respuesta frente a la recuperación de estrés hídrico en semillas sometidas a condiciones previas más restrictivas para la germinación (10 \leq 35 y -1,2MPa).

Con respecto a la respuesta de los diferentes orígenes se pudo identificar que el origen 6 (Nueva Esperanza) respondió mejor ($p < 0,05$) a la recuperación de estrés hídrico. A través de un ensayo similar, Ojeda-Silvera *et al.* (2015) lograron identificar variedades de albahaca sensibles al estrés hídrico en la etapa de emergencia y variedades que se sobreponen al estrés al que fue sometido.

Tasa de germinación. Los resultados fueron significativos ($p < 0,05$) para los factores origen, potencial osmótico y temperatura, así como también para las interacciones dobles, no así para la interacción triple. Las mayores ($p < 0,05$) tasas de germinación se obtuvieron para las temperaturas 20 \leq 30 °C, potenciales osmóticos testigos y orígenes 4 (Bell Ville), 6 (Nueva Esperanza) y 8 (Pool noroeste de Córdoba). En la interacción potencial osmótico por temperatura los mayores valores de tasa de germinación se obtuvieron para la temperatura 20 \leq 30 en condiciones de potencial osmótico testigo (0 MPa), seguidos de la temperatura 10 \leq 35 en el igual potencial (Tabla 4.17).

Tabla 4.17. Tasa de germinación de plántulas normales a los 21 días según temperatura y potencial osmótico.

Temperatura (°C)	Potencial Osmótico (MPa)	Tasa de germinación (%)
20<=>30	0	4,34 A
10<=>35	0	2,96 B
20<=>30	-0,8	0,70 C
10<=>35	-0,8	0,22 D
20<=>30	-1,2	0,04 E
10<=>35	-1,2	0,01 E

Tasas de germinación con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la interacción potencial osmótico con origen se destaca con mayor tasa de germinación a los orígenes 6 (Nueva Esperanza) y 4 (Bell Ville) en potenciales osmóticos testigo (0 MPa) seguidos del resto de los orígenes en el mismo potencial. En potencial osmótico -0,8 MPa, el mejor comportamiento lo tuvo el origen 8, seguido de los orígenes 1, 4 y 6 (Tabla 4.18).

Tabla 4.18. Tasa de germinación de plántulas normales a los 21 días según origen y potencial osmótico.

Origen	Potencial Osmótico (MPa)	Tasa de germinación (%)
Nueva Esperanza, Santiago del Estero	0	4,12 A
Bell Ville, Córdoba	0	4,10 A
Noroeste de Córdoba	0	3,78 B
Campo Durán, Salta	0	3,72 B
La Unión, Salta	0	3,70 B
Parque San Martín, Entre Ríos	0	3,66 B
Este de Chaco	0	3,26 C
Villa Giardino, Córdoba	0	2,85 D
Noroeste de Córdoba	-0,8	1,27 E
Nueva Esperanza, Santiago del Estero	-0,8	0,65 F
Bell Ville, Córdoba	-0,8	0,46 F
Campo Durán, Salta	-0,8	0,46 F
La Unión, Salta	-0,8	0,26 G
Parque San Martín, Entre Ríos	-0,8	0,24 G
Este de Chaco	-0,8	0,18 G
Villa Giardino, Córdoba	-0,8	0,16 G
Campo Durán, Salta	-1,2	0,06 G
Bell Ville, Córdoba	-1,2	0,04 G
La Unión, Salta	-1,2	0,04 G
Villa Giardino, Córdoba	-1,2	0,02 G
Nueva Esperanza, Santiago del Estero	-1,2	0,01 G
Noroeste de Córdoba	-1,2	0,01 G

Este de Chaco	-1,2	0,01 G
Parque San Martín, Entre Ríos	-1,2	0,00 G

Tasas de germinación con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Puede observarse que la tasa de germinación se redujo de forma significativa ($p < 0,05$) a medida que el estrés hídrico se incrementó, lo que demuestra tal como lo mencionan Aparecida Delachiave y Zambello de Pinho (2003) y Ojeda-Silvera *et al.* (2015) que la velocidad de emergencia de las semillas depende de la eficiencia del proceso de germinación y de las condiciones en las que se desarrolle.

El presente estudio realiza un avance en el conocimiento de las tolerancias o umbrales ambientales estrechos de la especie, que como describe Foden *et al.*, (2009) es uno de los cinco puntos importantes que es necesario investigar para identificar la respuesta de cada especie al cambio climático.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente capítulo dan respuesta a los interrogantes: ¿Qué variables climáticas definen el momento de brotación y cómo varía este momento y su duración en relación al origen de procedencia del material utilizado? y ¿cómo se ve afectada la germinación y el crecimiento radicular de materiales de diferentes orígenes según la temperatura y potencial osmótico al que son sometidos en este proceso? Se concluye que:

Existe variación adaptativa según estrategias de brotación de familias de polinización abierta de *P. alba* introducidas en el ensayo de origen de Santa María en Santiago del Estero. Esta variación se diferencia en 3 grupos de brotación y 2 grupos de velocidad de brotación, y de la combinación de estas variables surgen 4 grupos de estrategia de brotación.

Se evidencia la existencia de una estructura espacial diferencial tanto para los grupos de brotación (temprana, intermedia y tardía) como para los grupos de velocidad media de crecimiento de los brotes (rápida y lenta).

Existe un patrón que relaciona los grupos de brotación con los grupos de velocidad media de crecimiento de los brotes, donde todos los orígenes que conforman el grupo de velocidad media de crecimiento de los brotes rápida se encuentran dentro del grupo de brotación tardía.

Las poblaciones de *P. alba* más meridionales en su distribución presentan una brotación temprana pero lenta, mientras que la más septentrional presenta una brotación tardía y lenta.

Las temperaturas medias anual y del mes más frío diferencian los grupos de brotación y los de velocidad media de crecimiento de los brotes.

En base a estas conclusiones se sugiere que en caso de transferencia de materiales genéticos de *P. alba* de un lugar a otro debiera considerarse la estrategia de brotación (combinación del grupo de brotación y grupo de velocidad media de crecimiento del brote) al cual pertenece la población, para que pueda adaptarse al lugar donde se realizará la plantación, de modo que la planta brote en un período en el que ya no exista riesgo de daño por evento climático no apto para la población.

Existe variación adaptativa de las poblaciones a diferentes condiciones de estrés hídrico y temperatura evidenciadas en el rango de porcentajes de germinación obtenidos.

Existe una fuerte interacción entre los factores (temperatura, origen y potencial osmótico) que influyen en la germinación de *Prosopis alba* cuando se somete a estrés hídrico. El comportamiento diferencial demuestra una variación adaptativa al momento de la germinación por origen.

Las semillas del origen 8 (Pool noroeste de Córdoba), que representa el origen más árido de crecimiento, es la que mejor comportamiento tiene al ser sometido a estrés hídrico leve (potencial osmótico -0,8 MPa) en términos de semillas germinadas a los 21 días, expresada en porcentaje.

La alternancia de temperaturas 20-30 °C representa las mejores condiciones para la germinación de semillas de *P. alba* en todas las poblaciones.

En concentraciones osmóticas de -1,2 MPa todos los orígenes de las semillas de *P. alba* presentan similar valor de porcentaje de germinación (< 5 %).

La alternancia de temperatura 10-35 expresa mayor largo radicular a los 20 días.

BIBLIOGRAFÍA

- Aparecida Delachiave, M.E. y Zambello De Pinho, S. (2003) Germination of *Senna occidentalis* link: Seed at different osmotic potential levels. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, **46**, 163-166.
- Arce, P. y Balboa, O. (1988). Some aspects of the biology of *Prosopis* growing in Chile. In: Habit, M.A., ed. The current state of knowledge on *Prosopis juliflora*. Roma, FAO, 313-322.
- Bazzaz, F.A. (1973) Seed Germination in Relation to Salt Concentration in Three Populations of *Prosopis farcta*. *Oecologia*, **80**.
- Blum, A. (2005) Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential - Are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Australian Journal of Agricultural Research*, **56**, 1159-1168.
- Carnelos, D., Zapiola, G.M.F., Peretti, M. y Long, M.E.F. (2020) Modificaciones del comportamiento fenológico de algunas especies forestales como consecuencia de cambios en el clima de la Ciudad de Buenos Aires (Argentina). *Agronomía & Ambiente*, **39**.
- Carranza, C., Verzino, G., Di Rienzo, J., Ledesma, M. y Joseau, J. (2000) Componentes de la variación adaptativa en *Prosopis Chilensis*: el índice de brotación. *Multequina*, **9**, 55-64.
- Catalán, L.A. y Balzarini, M. (1992) Improved laboratory germination conditions for several arboreal *Prosopis* species: *P. chilensis*, *P. flexuosa*, *P. nigra*, *P. alba*, *P. caldenia* and *P. affinis*. *Seed science and technology*, **20**, 293-298.
- Catalán, L., Balzarini, M., Taleisnik, E. y Sereno, R. (1993) Effects of salinity on germination and seedling growth of *Prosopis flexuosa* (D . C .). *Forest Ecology and Management*, **63**.
- Cony, M. A., y Trione, S. O. (1996). Germination with respect to temperature of two Argentinian *Prosopis* species. *Journal of Arid Environments*, **33**(2), 225-236.
- Cony, M.A. y Trione, S.O. (1998) Inter-and intraspecific variability in *Prosopis flexuosa* and *P. chilensis*: seed germination under salt and moisture stress. *Journal of Arid Environments*, **40**, 307-317.
- Cordoba, A. y Verga, A. (2006) Método de análisis fenológico de un rodal. su aplicación en un enjambre híbrido de *Prosopis spp.* *Congreso Latinoamericano IUFRO. 2. 2006 10 23-27, 23 al 27 de octubre de 2006. La Serena, Chile. CL.*
- Darwin, C. (1963). *El origen de las especies por la selección natural* (Vol. 2). Ediciones Ibéricas y LCL.
- Debandi, G., Rossi, B.E., Villagra, P.E., Giantomasi, M.A. y Mantován, N.G. (2019) Phenology of *Prosopis flexuosa* in the Central Monte Desert Spatial and temporal synchronicity in the phenological events of *Prosopis flexuosa* in the Central Monte Desert Sincronización espacial y temporal de los eventos fenológicos de *Prosopis flexuosa* en. , **507**.
- De La Fuente; L. M.; P. L. Lobos y R. Ginocchio. 2011. Fitoestabilización de depósitos

- de Relaves en Chile. Propagación de especies vegetales nativas y endémicas. Tratamientos pregerminativos para guía de propagación de especies vegetales nativas y endémicas. Guía N° 5. CIMM, INIA, INTIHUASI. CHILE. 92 p.
- De Santa Olalla Mañas, F.M., P, L.F. y Calera Belmonte, A. (2005) *Agua y Agronomía*, MUNDI-PREN. MUNDI-PRENSA.
- Dietrichson, J. (1964) The selection problem and growth rhythm. *Silvae Genet*, **13**, 178-184.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C.W. (2018) InfoStat version 2018. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Fanti, S.C. y Andrade Perez, S.C.J.G.D.A. (2004) Processo germinativo de sementes de paineira sob estresses hídrico e salino. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, **39**, 903-909.
- Felker, P., Clark, P.R., Laag, A.E. y Pratt, P.F. (1981) Salinity tolerance of the tree legumes: Mesquite (*Prosopis glandulosa* var. torreyana, *P. velutina* and *P. articulata*) Algarrobo (*P. chilensis*), Kiawe (*P. pallida*) and Tamarugo (*P. tamarugo*) grown in sand culture on nitrogen-free media. *Plant and soil*, **61**, 311-317.
- Fontana, L. y Luna, C. V. (2015) Influencia de la procedencia geográfica sobre los parámetros morfométricos de semillas de *Prosopis alba*. *Multequina*, 33-45.
- Foden, W., Mace, G., Vié, J.-C., Angulo, A., Butchart, S., DeVantier, L., Dublin, H., Gutsche, A., Stuart, S. and Turak, E. 2008. Species susceptibility to climate change impacts. In: J.-C. Vié, C. Hilton-Taylor and S.N. Stuart (eds). *The 2008 Review of The IUCN Red List of Threatened Species*. IUCN Gland, Switzerland.
- Frassoni, J.E. y Joseau, M.J. (2019) Development of a height estimation method based on the diameter at breast height of *Prosopis alba* Grisebach selected populations from a progeny trial in Santiago del Estero, Argentina. *Agriscientia*, **36**, 89-95.
- Galera, M.F. (2000) *Los algarrobos: las especies del género Prosopis (algarrobos) de América Latina con especial énfasis en aquellas de interés económico*. Gráficas, Graziani.
- Garau, A., de Delfino, S.F. y Berrondo, G. (2008) Influencia de factores climáticos en las fechas de inicio de floración y brotación de clones de álamo en el Delta del Paraná, Argentina. *Forest Systems*, **9**, 169-176.
- Gianoli, E. (2004). Plasticidad fenotípica adaptativa en plantas. *Fisiología Ecológica en Plantas: Mecanismos y Respuestas al Estrés en los Ecosistemas; M. Cabrera. (ed). Departamento de Botánica. Universidad de Concepción, Chile. pp, 13-25.*
- Gonzalez, D. (2007) Tolerancia al estrés salino del vinal (*Prosopis ruscifolia*): germinación, crecimiento y ajuste osmótico.
- IPCC, I.P.O.F.C.C. (2007) Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

- IPCC. (2014) Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad - Resumen para responsables de políticas. *Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.*, 34.
- ISTA. (2016) International seed testing association. ISTA Germination Sec. Chapter 19: pp. 19–41.
- Jarrell, W. y Virginia, R. (1984) Salt tolerance of mesquite. *California Agriculture*, **38**, 28.
- Joseau, M.J. (2005) Control de la calidad de la semilla de *Prosopis*.
- Joseau, M.J. (2006) *Caracterización morfológica y genética de poblaciones del género Prosopis del Chaco semiárido del norte de Córdoba y sur de Santiago del Estero. Tesis para optar al grado de Doctora en Ciencias Agropecuarias.* Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba.
- Levins, R. (1968) *Evolution in changing environments: some theoretical explorations.* Princeton University Press.
- López Lauenstein, D., Fernández, M.E. y Verga, A. (2012) Respuesta diferenciada a la sequía de plantas jóvenes de *Prosopis chilensis*, *P. flexuosa* y sus híbridos interespecíficos: implicancias para la reforestación en zonas áridas. *Ecología austral*, **22**, 43-52.
- López, C., Maldonado, A. y Salim, V. (2008) Variación genética de progenies de *Prosopis alba*. *Forest Systems*, **10**, 59-68.
- Maguire, J.D. (1962) Speed of germination—Aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor 1. *Crop science*, **2**, 176-177.
- Marcó, M.A., Cortizo, S.C., Fornes, L.F., Gauchat, M.E., López, J.A., López Lauenstein, D., (2016) *Domesticación y mejoramiento de especies forestales. 1a. ed. 201*
- Menzel, A. (2003) Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO. *Climatic Change*, **57**, 243-263.
- Mondino, V. A. (2014). *Variación geográfica y genética en caracteres adaptativos iniciales de Nothofagus pumilio (Poepp. et Endl.) Krasser en una zona de alta heterogeneidad ambiental* (Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Buenos Aires).
- Moreno, J.M. (2005) 12. *Impactos sobre los riesgos naturales de origen climático c. riesgo de incendios forestales. (581- 615)*
- Murphy, G.M., Sierra, E.M. y Pérez, S.P. (1999) Variación de la temperatura máxima diaria primaveral en un espacio verde de la ciudad de Buenos Aires y su relación con la brotación de las plantas. *Revista Facultad de Agronomía*.
- Ocampo, E.N. y Orquin, L.E. (1990) Aspectos fenológicos de 19 especies del bosque de caldén y sus posibles relaciones con la temperatura y las precipitaciones pluviales. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, **65**, 5-12.
- Ojeda-Silvera, C.M., Murillo-Amador, B., Nieto-Garibay, A., Troyo-Diéguez, E., Ruíz-Espinoza, F.H. y García-Hernández, J.L. (2015) Emergencia y crecimiento de

- plántulas de variedades de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) sometidas a estrés hídrico. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, **2**, 151-161.
- Parizek, B., de la Reta, M., Catalán, L., Balzarini, M. y Karlin, U. (2000) Observaciones fenológicas del algarrobo negro (*Prosopis flexuosa* D.C.) y del algarrobo blanco (*Prosopis chilensis* (Mol. stuntz) en el Chaco Árido, Argentina. *Multequina*, **9**, 135-146.
- Passera, C.B. (2000) Fisiología de *Prosopis* spp. *Multequina*, **9**, 53-80.
- Pece, M.G., Acosta, M.M. y Sobrero, M.T. (2013) Influencia de la temperatura y la luz sobre la germinación de *Cercidium praecox* (Ruiz & Pav. ex Hook.) Harms subsp. *Praecox*. *La Revista Forestal Venezolana*, **57**, 29-36.
- Perez, S. D. A., y Tambelini, M. (1995). Effect of saline and water stress and of early aging of algaroba seed germination. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, **30**(11), 1289-1295.
- Quantum, G.I.S. (2016) Development Team (2016) Quantum Geographic Information System.
- Rehfeldt, J. (1984) Microevolution of conifers in the northern Rocky Mountains: a view from common gardens. *8. north American forest biology workshop, Logan, Utah (USA), 30 Jul-1 Aug 1984* p. Dept. of Forest Resources, Utah State Univ.
- Rhodes, D. y Felker, P. (1988) Mass screening of *Prosopis* (mesquite) seedlings for growth at seawater salinity concentrations. *Forest Ecology and Management*, **24**, 169-176.
- Salto, C.S. (2011) Variación genética en progenies de polinización abierta de *Prosopis alba* Griseb. de la Región Chaqueña. *Maestría en genética vegetal Thesis. Area de mejoramiento genético UNR-Concordia*.
- Schmalhausen, I. I. (1949). *Factors of evolution: the theory of stabilizing selection*. Blakiston.
- Sharifi, M.R., Nilsen, E.T., Virginia, R., Rundel, P.W. y Jarrell, W.M. (1983) Phenological Patterns of Current Season Shoots of *Prosopis glandulosa* var. *torreyana* in the Sonoran Desert of Southern California. *Flora*, **173**, 265-277.
- SAGyP e INTA (2013). Proyecto PNUD ARG/85/019.(Versión 9.0). Extraído de: <http://www.geointa.inta.gob.ar/2013/05/26/suelos-de-la-republica-argentina/>
- Sosebee, R.E., Wan, C., 1987. Plant ecophysiology: a case study of honey mesquite. Symposium on Shrub Ecophysiology and Biotechnology. Logan, Utah, pp. 103–117.
- Spano, D., Cesaraccio, C., Duce, P. y Snyder, R.L. (1999) Phenological stages of natural species and their use as climate indicators. *International Journal of Biometeorology*, **42**, 124-133.
- Venier, P., Ferreras, A.E., Verga, A. y Funes, G. (2015) Germination traits of *Prosopis alba* from different provenances. , 548-553.
- Wagner, R.G. y Colombo, S.J. (2001) *Regenerating the Canadian forest: principles and practice for Ontario*. Fitzhenry & Whiteside.

Zhao, K.-F. y Harris, P.J.C. (1992) The effects of iso-osmotic salt and water stresses on the growth of halophytes and non-halophytes. *Journal of Plant Physiology*, **139**, 761-763.

CAPÍTULO V

DEFINICIÓN DE POTENCIALES ÁREAS DE IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LAS POBLACIONES DE *P. alba*

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas ha tenido lugar una importante alteración de las condiciones atmosféricas. Múltiples evidencias señalan que este fenómeno no es parte de los cambios en el clima que han ocurrido en la historia de la tierra por variaciones de ciclos dinámicos naturales (Romo *et al.*, 2013), por lo que puede afirmarse que el cambio climático es producido por otras causas además de las naturales. Una de estas causas, y en la actualidad considerada como la principal es la actividad humana, aspecto sobre el que existe ya un amplio consenso (Oreskes, 2004), por ser el aumento de emisión de gases de efecto invernadero de origen antrópico la principal causa del calentamiento global (IPCC, 2001).

El cambio climático implica una alteración sistemática en los promedios y/o en la variabilidad de las variables que caracterizan el clima de la Tierra (IPCC, 2007) siendo la tendencia de aumento de la temperatura global (Romo *et al.*, 2013) la más destacada. Este fenómeno tiene consecuencias en la circulación del aire atmosférico, en el patrón de precipitaciones e incluso en el nivel del mar por deshielo de los glaciares, es por esto que el cambio climático es uno de los componentes del cambio global más difundido y analizado en la actualidad. Toranza *et al.* (2012) describe al cambio climático como un proceso en marcha, que continuará durante el siglo XXI aunque cesen las emisiones de gases de efecto invernadero y tendrá consecuencias sobre los sistemas biológicos. Sus efectos a nivel de organismos y poblaciones son múltiples (Araujo *et al.*, 2005; Bakkenes *et al.*, 2002; Parmesan y Yohe, 2003; Pearson y Dawson, 2003; y Peterson *et al.*, 2001) habiéndose documentado: variaciones en los rangos de especies y en la composición de las comunidades, desplazamientos altimétricos y/o latitudinales de comunidades vegetales o ecosistemas, y cambios en el funcionamiento de los ecosistemas. En la escala de especies, tres respuestas generales podrían ocurrir debido a

las anomalías climáticas: desplazamiento, adaptación (ya sea en términos de cambios evolutivos o adaptaciones fisiológicas) o extinción local (Holt, 1990; Peterson *et al.*, 2001). Estas variaciones en las respuestas dependen de las capacidades de las especies. Tal como lo menciona Sandel *et al.* (2011) especies con fuertes capacidades de dispersión que habitan en climas relativamente estables son capaces de responder a los cambios climáticos; por el contrario, las especies con capacidades de dispersión débiles ante cambio climático pueden verse afectadas en su rango de distribución e incluso pueden extinguirse, a pesar de que el hábitat apropiado esté presente en otros lugares. Al respecto Hughs (2000), Parmesan y Yohe (2003), y Corlett y Westcott (2013) comparan la velocidad del cambio climático con la velocidad de desplazamiento de las plantas ante este cambio, es decir cuánto deben moverse en comparación a cuanto son capaces de hacerlo.

Si bien existe cierta variación en las respuestas observadas, la tendencia de cambio en la distribución de las especies muestra principalmente un corrimiento de los rangos de distribución hacia latitudes altas (Godoy Bürki, 2016; Márquez Linares *et al.*, 2006; Parmesan *et al.*, 1999) o zonas de mayor altitud (Chen *et al.*, 2009; Toranza *et al.*, 2016), ocasionando efectos tales como aislamiento, fragmentación y pérdida de hábitats favorables (Romo *et al.*, 2013). Por el contrario Trond *et al.* (2012) manifiesta que la redistribución de especies no siempre se produce hacia los polos, especialmente si las alteraciones ambientales causadas por el cambio climático (ej: tipo de hábitat, microclima, precipitación humedad) se producen en otras direcciones. Diffenbaugh y Field (2013) sostiene que los cambios observados se intensificarán en las próximas décadas, desarrollándose a un ritmo que será al menos un orden de magnitud mayor que los cambios ocurridos en los ecosistemas terrestres durante los últimos 65 millones de años.

En este contexto, estudiar la distribución presente (modelos de nichos) y proyectar los cambios futuros de distribución potencial es fundamental para poder planificar y eventualmente mitigar los impactos sobre la biodiversidad. Toranza *et al.* (2012) señala, que este tipo de estudios son especialmente importantes en los bordes del rango de distribución de las especies, ya que se espera que dichas poblaciones sean las más sensibles al cambio climático y las primeras en expresar cambios en los parámetros demográficos (Romo *et al.*, 2013).

Los modelos de nichos y los modelos de distribución potencial se utilizan porque indican la idoneidad del hábitat para el desarrollo de poblaciones de una especie concreta a partir de sus datos de presencia y/o ausencia (Araujo y Guisan, 2006), a la vez que permiten evaluar la influencia de diversos factores climáticos sobre la distribución de las especies. Los modelos de distribución potencial constituyen una herramienta valiosa en el estudio del cambio climático y la biodiversidad (Bravo Cadena *et al.*, 2011), siendo hoy en día muy utilizados en investigación y gestión. Se han utilizado para fines muy diversos, desde el análisis de especies invasoras e identificación de especies vulnerables al cambio climático, hasta la extensión de enfermedades provocadas por vectores animales (Araujo y Guisan, 2006; Felicísimo, Muñoz, Mateo, 2012; Guisan y Zimmermann, 2000). Esta información es utilizada para generar, a nivel nacional y provincial, diversas estrategias de conservación y/o manejo a diferentes escalas (SAyDS, 2015).

Jáuregui Ostos (2003) sostiene que para producir modelos de distribución potencial es necesario contar con Modelos Climáticos Generales (MCGs) lo que constituyen una representación numérica tridimensional de la dinámica atmosférica y de la circulación global alrededor de la Tierra, a lo que el IPCC (2014) agrega también que es una herramienta que sirve para pronosticar la respuesta del clima a futuro ante los aumentos de los gases efecto invernadero en la atmósfera. Al emplearse en los estudios de cambio climático, se convierten en escenarios de dicho fenómeno. Tal como lo menciona Vichot-Illano *et al.* (2019), las predicciones del clima global futuro están sujetas a un alto grado de incertidumbre que varía según el modelo global utilizado, siendo la limitante más importante la disponibilidad de datos a resoluciones finas, para períodos y sitios específicos (Bravo Cadena *et al.*, 2011). Sin embargo en la actualidad los modelos climáticos constituyen la herramienta más confiable disponible para la generación de información acerca de las perspectivas climáticas futuras (SAyDS 2015).

A partir del 2008, se desarrolló la fase 5 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados- CMIP5 (Taylor *et al.*, 2012), que incluyó simulaciones globales de largo y mediano plazos, utilizando en las simulaciones a largo plazo no solamente modelos atmosféricos y acoplados océano-atmósfera, sino también modelos del sistema terrestre (Vichot-Illano *et al.*, 2019). La resolución espacial de los modelos acoplados

utilizados en CMIP5 fue superior a los de la fase 3- CMIP3 (Meehl *et al.*, 2007) y se ha demostrado que el CMIP5 tiene mayor capacidad para simular extremos climáticos, dado sus patrones de tendencia y su menor dispersión (Vichot-Illano *et al.*, 2019). Actualmente, están disponibles escenarios de cambio climático, calculados sobre dos horizontes temporales: clima futuro cercano (2015-2039), y clima futuro lejano (2075-2099), ambos elaborados en el marco de la CMIP5 (Taylor *et al.*, 2012) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas. Estas proyecciones de escenarios climáticos del siglo XXI provienen de 42 experimentos con Modelos Climáticos Generales (MCGs), y han sido validados por numerosos investigadores para diferentes partes del mundo: Bellouin *et al.* (2011), Meehl *et al.* (2013), Good *et al.* (2013), Bonilla-Ovallos y Mesa Sánchez (2017), Kohyama *et al.* (2017), Barros y Doyle (2018) y He *et al.* (2019).

Con respecto a las proyecciones realizadas en el género *Prosopis* existen trabajos que modelan la distribución de *Prosopis flexuosa* D.C. en la provincia biogeográfica del Monte (Perosa *et al.*, 2014), de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnstonen (Palacios Romero *et al.*, 2016), de *P. hassleri* Harns en la provincia de Formosa (Kees, 2013), de *P. alba* y *P. hassleri* en la Región Chaqueña (Venier *et al.*, 2013), pero no hay evidencias de estudios sobre la distribución completa de *P. alba*.

En el presente capítulo se proyecta la distribución de hábitat actual de *P. alba* a dos escenarios climáticos futuros (RCP 4.5 y 6.0) planteados por el IPCC y se define potenciales áreas de impacto del cambio climático. Para ello, se estableció como objetivo de este capítulo definir potenciales áreas de impacto del cambio climático sobre las poblaciones de *P. alba*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Distribución potencial de *P. alba* bajo dos escenarios climáticos futuros (IPCC)

Los 4 escenarios climáticos planteados por el IPCC del año 2013, RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, se identifican por su forzamiento radiativo en watts por

metro cuadrado al que llegan en el año 2100, que varía desde 2,6 a 8,5 W m⁻². El escenario RCP2.6 plantea una tendencia al forzamiento radiativo decreciente en el 2100, es un escenario de extrema mitigación del cambio climático, mientras que el escenario RCP4.5 plantea una tendencia estable, con emisiones moderadas, y los escenarios RCP6.0 y RCP8.5 plantean tendencias crecientes para igual fecha. El escenario RCP8.5 considera un incremento sostenido para fines del siglo XXI, representando el escenario más desfavorable posible en términos de emisiones (SAyDS, 2015). La SAyDS (2015) expresa que en el escenario RCP 2.6, los cambios climáticos serían semejantes al del escenario RCP 4.5, en lo que respecta al horizonte temporal de futuro cercano y con escasos cambios adicionales hacia fin de siglo. Por esta razón, no se estudiaron los escenarios climáticos basados en el RCP 2.6, al considerar que no aportaría información adicional. Por otra parte, el escenario RCP 8.5 corresponde al caso extremo en que las emisiones continuarán creciendo con las tendencias actuales hasta fin de siglo.

En el presente capítulo se utilizó como principal referencia el informe presentado por el Centro de Investigaciones de Mar y Atmósfera (CIMA) en su informe final para la tercera comunicación Nacional de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (SAyDS, 2015) para Argentina. Este informe plantea una división del territorio nacional para tratar los cambios climáticos en cuatro grandes áreas: Andina, Centro, Húmeda y Patagonia. La distribución de *P. alba* ocupa principalmente la región Centro, pero también parte de su distribución se encuentra en la región Andina y Húmeda. La región Centro está formada por las provincias de San Luis, La Pampa, Córdoba, Tucumán, Santiago del Estero, Chaco y Formosa, donde la característica común de la región es su condición monzónica en la precipitación con una marcada estación seca invernal. La región Andina está integrada por las provincias de Mendoza, San Juan, La Rioja, Catamarca, Salta y Jujuy, y se caracteriza por un clima fuertemente condicionado por la orografía de los Andes con zonas sumamente áridas en el piedemonte andino. La región Húmeda, integrada por las provincias de Misiones, Corrientes, Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires, se caracteriza por no tener una pronunciada estación seca y no presentar condiciones reiteradas de estrés hídrico.

Se seleccionó para trabajar la proyección RCP 4.5 porque plantea un escenario de emisión moderado y la proyección RCP 6.0 con tendencia creciente de emisión. Para la selección del modelo se dio mayor importancia a la variable T° en su distribución anual,

de verano e invernal ya que la variable precipitación no es una variable que presente mayores cambios en las zonas analizadas. En base a esto y por ser un modelo que presentó buen desempeño en las tres regiones de distribución de *P. alba* según el informe del CIMA en su informe final para la tercera comunicación Nacional de SAyDS (2015), el modelo elegido fue CCSM4, modelo elaborado por el National Atmospheric Research- NCAR- EEUU en el 2010.

Se descargaron las 6 capas bioclimáticas, que fueron utilizadas para modelar el nicho climático en el capítulo II (BIO2- rango diurno medio, BIO3- isoterma, BIO8- temperatura media del trimestre más húmedo, BIO14- precipitación del mes más seco, BIO15- estacionalidad de precipitación y BIO18- precipitación del trimestre más cálido), en una resolución de 5 minutos para ambos escenarios climáticos futuros modelados para el año 2070 en la versión 1.4 de la página de Worldclim (Hijmans *et al.*, 2005a).

Los modelos de distribución potencial se construyeron con el programa MaxEnt (Phillips *et al.*, 2017b), que es una aplicación basada en ajustes de máxima entropía (Phillips, 2006; Phillips y Dudík, 2008) ampliamente utilizada en este tipo de trabajos y que muestra resultados adecuados en comparación con otros métodos posibles (Elith *et al.*, 2006). Se proyectó la distribución futura de *P. alba* para la proyección RCP 4.5 y 6.0, manteniendo la configuración descrita en el ajuste del modelo en el Capítulo II.

Definición de las potenciales áreas de impacto del cambio climático sobre las poblaciones de *P. alba*

Se evaluaron los procesos de contracción- expansión, y/o desplazamiento del rango de distribución de *P. alba* mediante la comparación de la distribución actual y la estimación de las distribuciones futuras según las proyecciones RCP 4.5 y 6.0 utilizando el programa QGIS (2016). Para esto se calculó la diferencia entre los valores de probabilidad de presencia futura en ambas proyecciones con los valores de presencia actuales. Se determinaron potenciales nuevas áreas adecuadas para la persistencia de la especie.

Impacto del cambio climático sobre la variación adaptativa de la especie

Teniendo en cuenta los estudios de adaptación realizados, se definieron las futuras potenciales zonas favorables para la especie según la temperatura de germinación definida como óptima en el capítulo IV ($20 \leq 30$ °C). Para esto se descargó del *Earth Engine Data Catalog* (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog>) el producto NEX-GDDP: *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Climate Projections* para la proyección, escenario y año de proyección utilizado (CCSM4-RCP4.5 Thrasher *et al.*, 2012); y se utilizó una capa climática de temperatura mínima y una de temperatura máxima de los meses de diciembre, enero, febrero (meses de germinación natural de la especie post caída de frutos). La zona definida como óptima fue la que comprendía temperaturas entre 18 y 22 °C como mínimas diarias y entre 28 y 32 °C como máximas diarias (variación igual a la seteada en la cámara de germinación).

Se analizaron las posibilidades de ocurrencia de los cambios de distribución proyectados en la presente tesis en base a resultados obtenidos en cuanto al desplazamiento probable de las especies en valores de altitud y latitud en el territorio, realizado por otros investigadores (Hughs, 2000 y Parmesan y Yohe, 2003).

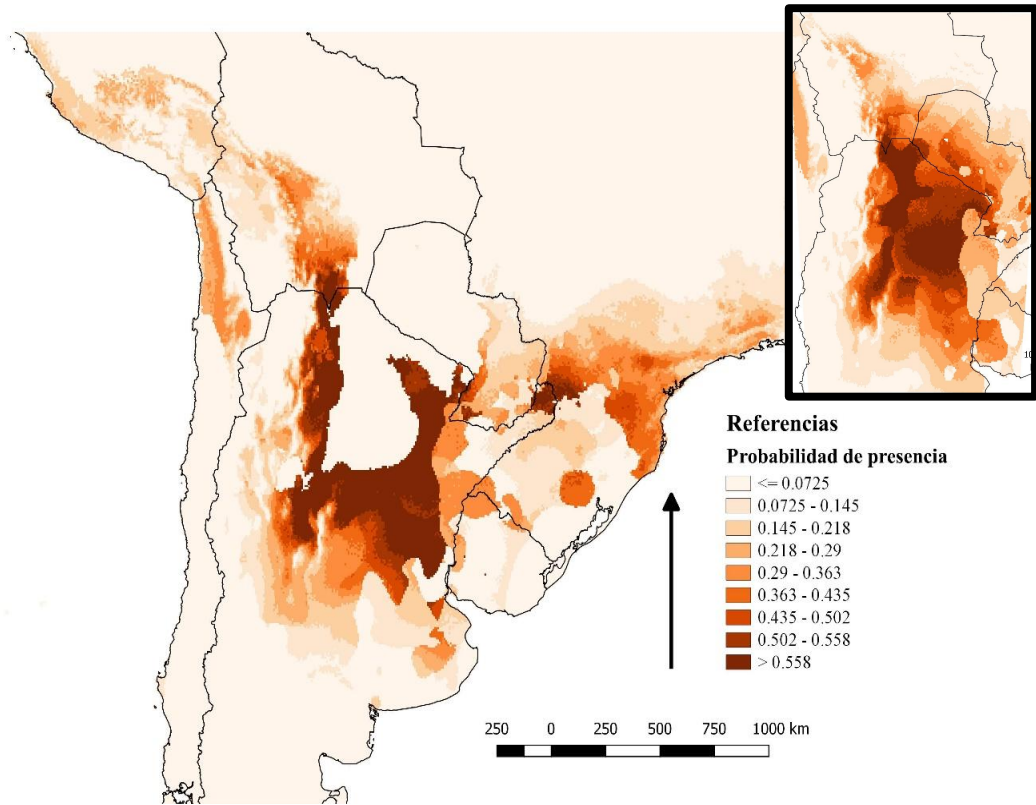
Se definieron las zonas prioritarias de colecta para la conservación de la especie, como las zonas de presencia actual que se mantendrán en la proyección futura para RCP 4.5. Para esto se trabajó con el programa R (R Core Team, 2019), se vectorizó las zonas de presencia con probabilidades mayores a 0,3 para nicho actual y futuro, y se calculó las zonas de intersección entre ambos vectores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Distribución potencial de *P. alba* bajo dos escenarios climáticos futuros (IPCC)

Los modelos de distribución de nicho proyectados para el año 2070 se observan en las Figura 5.1a (proyección RCP 4.5) y 5.1b (proyección RCP 6.0).

a)



b)

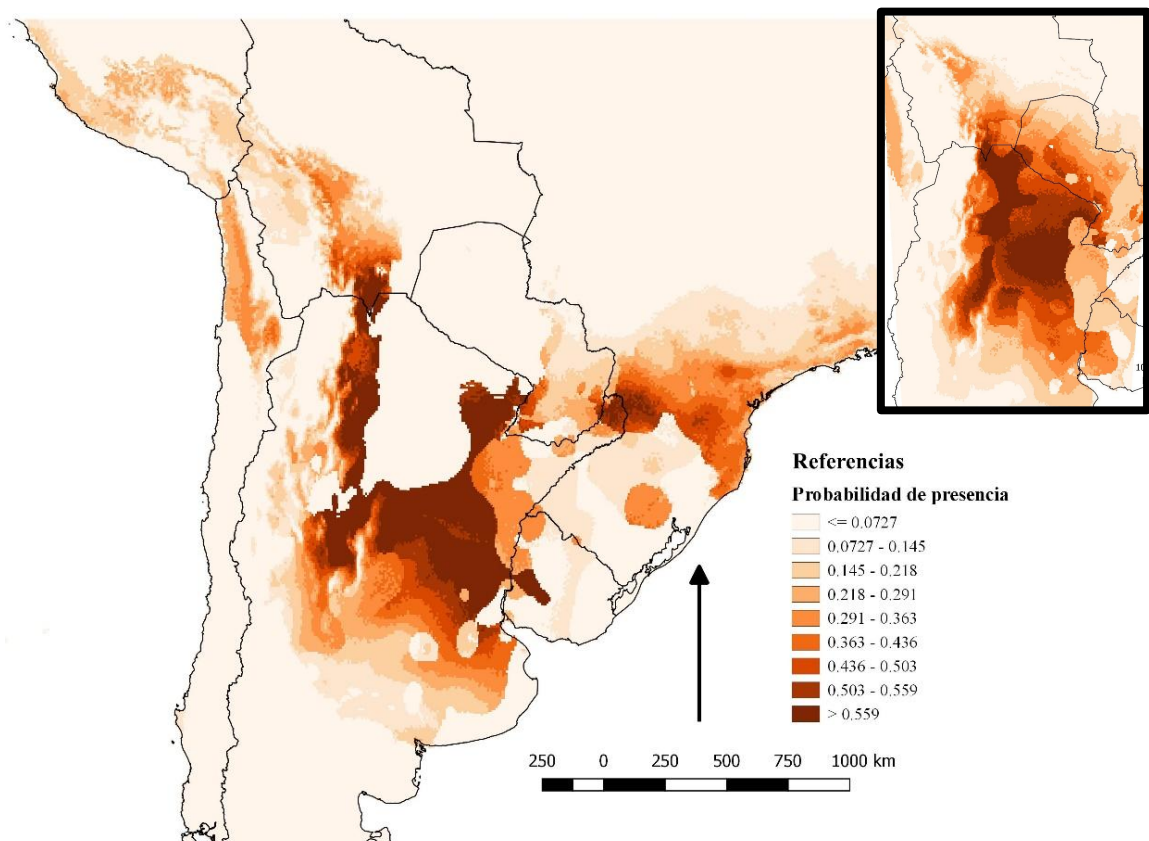


Figura 5.1. Modelos de proyección para el año 2070 de: a) RCP 4.5 y b) RCP 6.0. Ambas Figuras presentan un recuadro negro en su margen derecho superior con la distribución actual.

En ambas Figuras se observa que ambos modelos presentan grandes diferencias en valores de probabilidad futura de presencia de la especie en comparación con el modelo descrito en el capítulo II, lo que presupone un desplazamiento de los límites de la distribución de *P. alba*. Este desplazamiento se refleja principalmente en la zona centro norte de la distribución, caracterizada por ser una zona de baja altitud e isothermalidad, donde la especie desaparece; en esta zona llana y tal como lo describe Hoorn *et al.* (2013) la especie debe moverse mayores distancias para rastrear sus rangos de clima óptimo que en regiones heterogéneas, por lo que las especies tienden a desaparecer de estos lugares. Por otro lado la probabilidad de presencia aumenta principalmente hacia el extremo sur de la distribución (mejores condiciones para *P. alba*). Analizando las diferencias entre ambas proyecciones, se observa que en la proyección RCP 4.5 la probabilidad de presencia en la zona oeste es mayor, mientras que en la proyección RCP 6.0 la probabilidad disminuye, y aumenta mayormente en la zona sur. Estos resultados concuerdan con un sin número de trabajos en los que se describen tendencias de cambio en la distribución de las especies hacia latitudes altas y/o zonas de mayor altitud (Parmesan *et al.*, 1999; Márquez Linares *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2009; Venier *et al.*, 2013; Godoy Bürki, 2016; ; Toranza *et al.*, 2016).

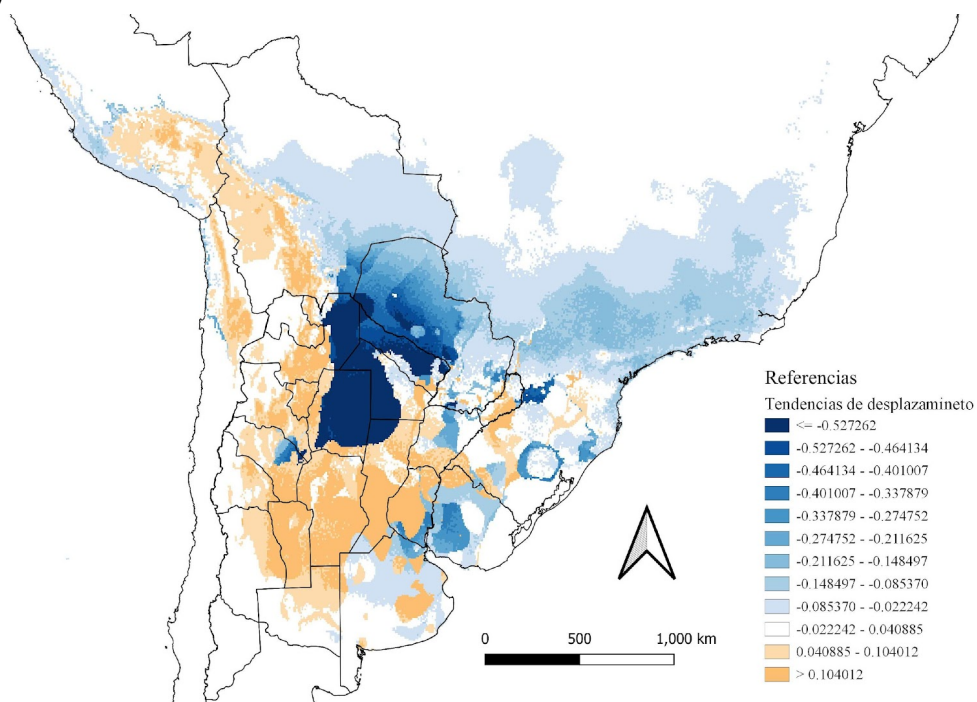
En cuanto al corrimiento de la frontera de la región este a la oeste puede estar asociada a que sea una región más heterogénea y que éstas áreas amortiguan mejor los cambios climáticos que las zonas llanas (Sandel *et al.*, 2011). Tanto Corlett y Westcott, (2013) como Diffenbaugh y Field, (2013) apoyan esta teoría y sostienen que a nivel global, las regiones con una heterogeneidad elevada funcionarán como refugios frente a cambios climáticos futuros.

Definición de las potenciales áreas de impacto del cambio climático sobre las poblaciones de *P. alba*

Se obtuvieron áreas potenciales de distribución según el impacto del cambio climático proyectadas bajo los modelos RCP 4.5 y RCP 6.0. Los mapas de la Figura 5.2 representan los cambios de probabilidades de presencia de *P. alba* o dicho de otra forma las tendencias del desplazamiento de la especie que fueron realizados comparando las proyecciones futuras con las actuales. La Figura 5.2a muestra la diferencia de la

proyección RCP 4.5 y la Figura 5.2b lo hace de RCP 6.0 (ambas del año 2070) con la distribución actual. Al tratarse de una diferencia entre la probabilidad futura y actual, los valores positivos representan las zonas donde las probabilidades a futuro aumentan, es decir con mayores posibilidades de presencia que en la actualidad y están representadas con colores rojizos; por el contrario, valores negativos representan zonas donde la especie tiene menores probabilidades de presencia que en la actualidad y están representados por colores azules, en esta coloración tintes más intensos (menores valores) representan zonas con mayores probabilidades de ausencia de la especie en el futuro.

a)



b)

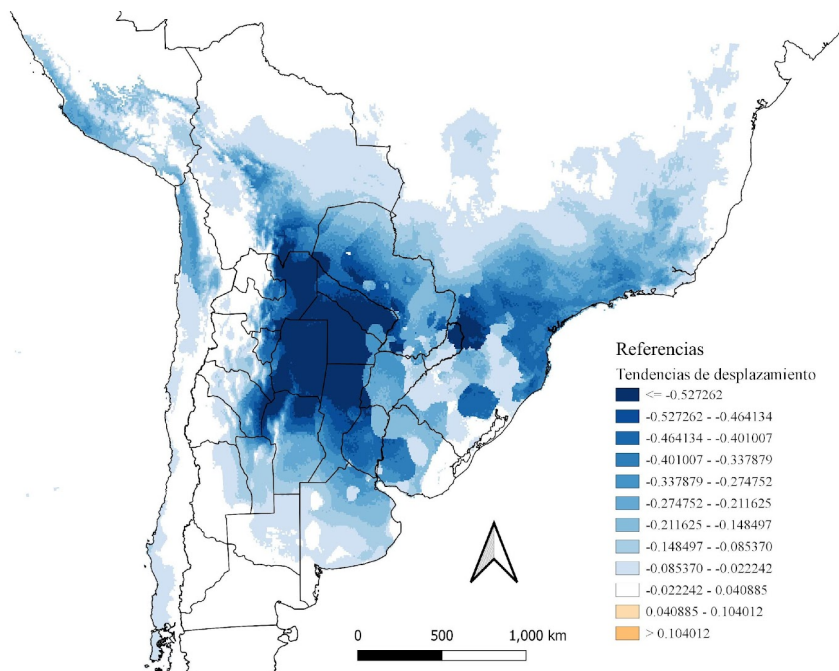


Figura 5.2. Tendencia del desplazamiento de proyección a) RCP 4.5 y b) RCP 6.0.

Se observa que existen grandes diferencias en las tendencias de las probabilidades entre ambas proyecciones ya que, mientras en RCP 4.5 la especie disminuye sus posibilidades de presencia en la zona NE de su distribución y existen áreas en la zona sur y oeste con mayores posibilidades de presencia, en la proyección RCP 6.0 la mayor parte de la distribución de *P. alba* tiene una tendencia negativa, es decir que la probabilidad de presencia disminuye para todo el rango geográfico.

Algunos autores (Parmesan y Yohe, 2003) sostienen que se han observado muchos tipos diferentes de respuestas al cambio climático, pero que la tendencia general dominante es el desplazamiento de las especies hacia los polos y/o hacia altitudes superiores para reajustar el aumento de las temperaturas y a los cambios en la precipitación, y es en este sentido los cambios observados en la proyección RCP 4.5 generada (figura 5.2.a), la zona marcada con color crema (hacia el sur y oeste de la distribución actual) presenta las mayores posibilidades de presencia futura. Otros autores (Godoy Bürki, 2016; Márquez Linares *et al.*, 2006; Parmesan *et al.*, 1999) apoyan esta teoría y sostienen que la tendencia de cambio en la distribución de las especies muestra principalmente un corrimiento de los rangos de distribución hacia latitudes altas o zonas de mayor altitud (Chen *et al.*, 2009; Toranza *et al.*, 2016)

Impacto del cambio climático sobre la variación adaptativa de la especie

Las zonas que presentan las mejores condiciones de germinación futura de la especie para RCP 4.5 según los resultados obtenidos en el capítulo IV, se muestran en la Figura 5.3 en color amarillo. Se observa que el límite sur de su distribución actual se mantiene y sigue presentando buenas condiciones de germinación, condiciones que se amplían hacia la costa brasilera.

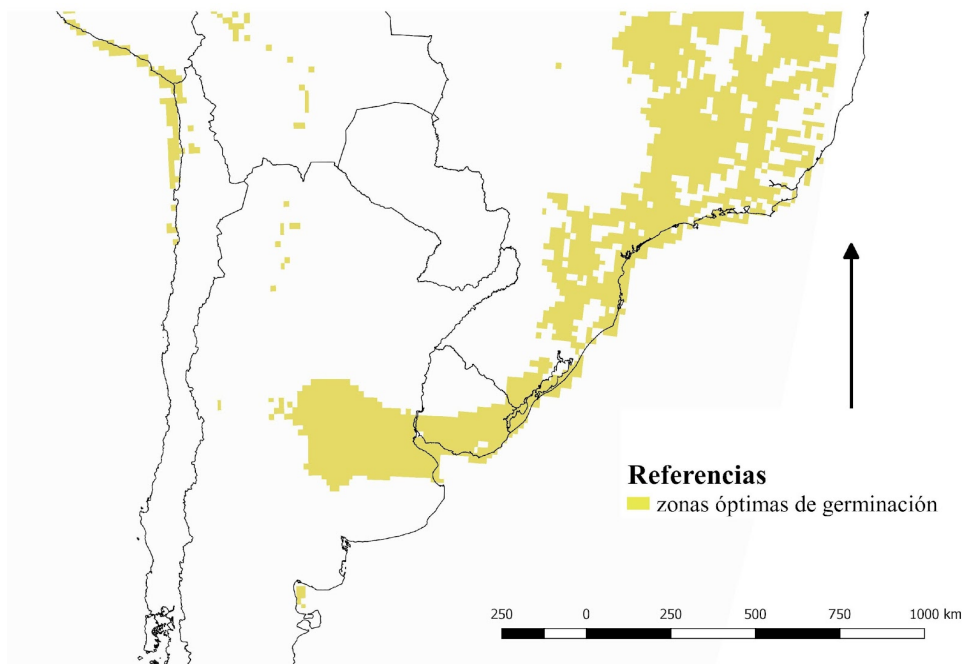


Figura 5.3. Zonas de condición óptima para la germinación futura ($20 \leq 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Existen efectos (Hughes, 2000) que el cambio climático tiene sobre las especies que se encuentran en relación a lo estudiado en la presente tesis. Uno de ellos se observa sobre la distribución, al respecto el autor plantea que en un cambio de $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ positivos de la temperatura media corresponde a un desplazamiento de 300 a 400 km de latitud o 500 m de altitud. Parmesan y Yohe (2003) encontraron cambios en los límites de distribución de las especies, se han movido en promedio $6,1 (\pm 2,4)$ km por década hacia los polos (o metros por década hacia arriba), encontrando grandes variaciones entre las especies estudiadas. Los cambios mensurados entre el nicho actual y las proyecciones futuras realizadas presentaron cambios altitudinales máximos de +562 m y un desplazamiento de la frontera de distribución de 231 km hacia el sur y de 296 km hacia el norte en los límites sur y norte respectivamente para $2,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ de aumento de

temperatura, siendo estos valores mayores pero de rango similar a los encontrados por Hughes (2000), no así a los reportados por Parmesan y Yohe (2003) quien aclara que el valor citado corresponde a una media y que existe una gran variación entre las especies reportadas. Estos resultados refuerzan las recomendaciones realizadas por Toranza *et al.* (2012) que señala la importancia de los estudios especialmente en los bordes del rango de distribución de las especies, ya que se espera que dichas poblaciones sean las más sensibles al cambio climático y las primeras en expresar cambios en los parámetros demográficos.

Las zonas donde la especie mantiene su ocupación en la proyección futura y que definimos como zonas prioritarias para su conservación se muestran en la Figura 5.4. en color amarillo. Son zonas en donde sería importante garantizar la conservación del recurso genético *Prosopis alba*, como así también potenciales fuentes dadoras de material genético desde donde será posible la colonización de las nuevas áreas ya que son zonas límites a los posibles nuevos avances de la especie en el territorio. Las zonas de importancia para la conservación fueron más estrechas que las obtenidas por Venier *et al.* (2013). Se comparte una estrecha franja que se extiende de norte a sur desde Salta a norte de Córdoba).

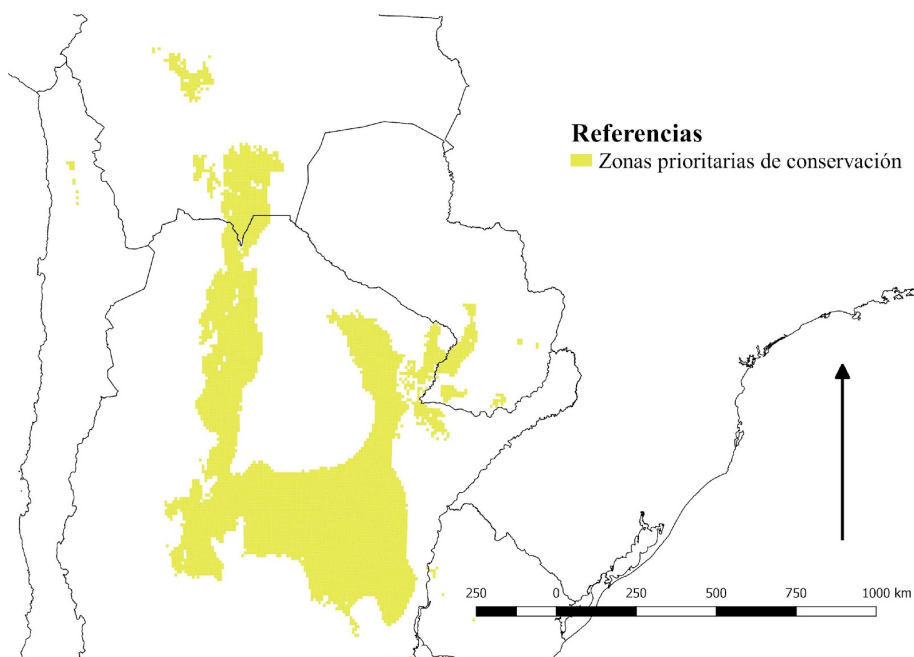


Figura 5.4. Zonas prioritarias para la conservación de *P. alba*.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente capítulo dan respuesta a los interrogantes: ¿Cómo se modificaría la distribución de *P. alba* en el futuro como consecuencia del cambio climático? ¿Qué zonas de la distribución actual serían las más afectadas y cuales se mantendrían? ¿Cuáles son las zonas de mayor importancia de conservación en relación al impacto del cambio climático? Se concluye que:

El modelo de *P. alba* proyectado a RCP 4.5 y 6.0 presentan cambios en las zonas de distribución, menores en RCP 4.5, con zonas donde aumentan (zona sur y oeste de la distribución) y otras donde disminuyen las probabilidades de presencia (zona norte y este), y mayores en RCP 6.0 donde la especie tiende a disminuir su probabilidad de presencia en toda su distribución actual. Ambas proyecciones (RCP 4.5 y 6.0) coinciden en que la zona centro norte de la distribución actual tiene a desaparecer en el futuro.

Los desplazamiento máximos encontrados en la distribución de la especie para la proyección CCSM4 y escenario RCP 4.5 son posibles de ocurrir según los registros bibliográficos existentes en cuanto a cambios en altitud y latitud.

Existen zonas de la distribución actual de la especie que mantiene su ocupación en la proyección futura que se definen como prioritarias para la conservación de *P. alba*.

BIBLIOGRAFÍA

- Araujo, M.B. y Guisan, A. (2006) Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of biogeography*, **33**, 1677-1688.
- Araujo, M., Pearson, R., Thuiller, W. y Erhard, M. (2005) Validation of species-climate impact models under climate change. *Global Change Biology*, **11**, 1504-1513.
- Bakkenes, M., Alkemade, J.R.M., Ihle, F., Leemans, R. y Latour, J.B. (2002) Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. *Global change biology*, **8**, 390-407.
- Barros, V.R. y Doyle, M.E. (2018) Low-level circulation and precipitation simulated by CMIP5 GCMS over southeastern South America. *International Journal of Climatology*, **38**, 5476-5490.
- Bellouin, N., Rae, J., Jones, A., Johnson, C., Haywood, J. y Boucher, O. (2011) Aerosol forcing in the Climate Model Intercomparison Project (CMIP5) simulations by HadGEM2-ES and the role of ammonium nitrate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **116**.
- Bonilla-Ovallos, C.A. y Mesa Sánchez, O.J. (2017) Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, **41**, 107.
- Bravo Cadena, J., Sánchez Rojas, G. y Gelviz-Gelvez, S.M. (2011) Estudio de la distribución de las especies frente al cambio climático.
- Chen, I.-C., Shiu, H.-J., Benedick, S., Holloway, J.D., Chey, V.K., Barlow, H.S. (2009) Elevation increases in moth assemblages over 42 years on a tropical mountain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**, 1479-1483.
- Corlett, R.T. y Westcott, D.A. (2013) Will plant movements keep up with climate change? *Trends in ecology & evolution*, **28**, 482-488.
- Diffenbaugh, N.S. y Field, C.B. (2013) Changes in ecologically critical terrestrial climate conditions. *Science*, **341**, 486-492.
- Elith, J., H. Graham, C., P. Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A. (2006) Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, **29**, 129-151.
- Felicísimo Á. M., Muñoz J., Mateo R.G., V.C.J. (2012) Vulnerabilidad de la flora y vegetación españolas ante el cambio climático. *Ecosistemas*, **21**, 1-6.
- Godoy Bürki, A.C. (2016) Efectos del cambio climático sobre especies de plantas vasculares del sur de los Andes Centrales: un estudio en el noroeste de Argentina (NOA).
- Good, P., Jones, C., Lowe, J., Betts, R. y Gedney, N. (2013) Comparing tropical forest projections from two generations of Hadley Centre Earth System models, HadGEM2-ES and HadCM3LC. *Journal of Climate*, **26**, 495-511.
- Guisan, A. y Zimmermann, N.E. (2000) Predictive habitat distribution models in

- ecology. *Ecological Modelling*, **135**, 147-186.
- He, W., Zhao, S., Wu, Q. y Wan, S. (2019) Simulating evaluation and projection of the climate zones over China by CMIP5 models. *Climate dynamics*, **52**, 2597-2612.
- Hijmans, R.J., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., Jarvis, A. y Richardson, K. (2005a) WorldClim, version 1.3. *University of California, Berkeley*.
- Hoorn, C., Mosbrugger, V., Mulch, A. y Antonelli, A. (2013) Biodiversity from mountain building, *Nat. Geosci.*, **6**, 154.
- Holt R. D. 1990. The microevolutionary consequences of climate change. *Trends in Ecology y Evolution*, **5(9)**, 311-315.
- Hughes, L. (2000) Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? *Trends in ecology & evolution*, **15**, 56-61.
- IPCC, C.C. (2001) The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom*, 881.
- IPCC, I.P.O.F.C.C. (2007) Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IPCC. (2014) Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad - Resumen para responsables de políticas. *Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.*, 34.
- Jáuregui Ostos, E. (2003). Algunos conceptos modernos sobre la circulación general de la atmósfera. *Investigaciones geográficas*, (50), 121-143.
- Kees, S. (2013) Modelado de nicho ecológico para estimación del área de dispersión de *Prosopis hassleri* harms en la provincia de Formosa – Argentina.
- Kohyama, T., Hartmann, D.L. y Battisti, D.S. (2017) La Niña–like mean-state response to global warming and potential oceanic roles. *Journal of Climate*, **30**, 4207-4225.
- Márquez Linares, M.A., Jurado Ybarra, E. y González Elizondo, S. (2006) Algunos aspectos de la biología de la manzanita (*Arctostaphylos pungens* HBK) y su papel en el desplazamiento de bosques templados por chaparrales. *Ciencia UANL*, **9**.
- Meehl, G.A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J.F.B. (2007) The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American meteorological society*, **88**, 1383-1394.
- Meehl, G.A., Washington, W.M., Arblaster, J.M., Hu, A., Teng, H., Kay, J.E. (2013) Climate change projections in CESM1 (CAM5) compared to CCSM4. *Journal of Climate*, **26**, 6287-6308.
- Oreskes, N. (2004) The scientific consensus on climate change. *Science*, **306**, 1686.
- Palacios Romero, A., Rodríguez Laguna, R., Flores, H., de la Luz, M., Jiménez Muñoz, E. y Tirado Torres, D. (2016) Distribución potencial de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) MC Johnston basada en un modelo de nicho ecológico. *Revista mexicana de ciencias forestales*, **7**, 35-46.

- Parmesan, C., Ryrholm, N., Stefanescu, C., Hill, J.K., Thomas, C.D., Descimon, H. (1999) Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature*, **399**, 579-583.
- Parmesan, C. y Yohe, G. (2003) A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, **421**, 37-42.
- Pearson, R.G. y Dawson, T.P. (2003) Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global ecology and biogeography*, **12**, 361-371.
- Perosa, M., Rojas, J.F., Villagra, P.E., Tognelli, M.F., Carrara, R. y Alvarez, J.A. (2014) Distribución potencial de los bosques de *Prosopis flexuosa* en la Provincia Biogeográfica del Monte (Argentina).
- Peterson, A.T., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J., Bartley, J., Buddemeier, R.W. y Navarro-Sigüenza, A.G. (2001) Effects of global climate change on geographic distributions of Mexican Cracidae. *Ecological modelling*, **144**, 21-30.
- Phillips, S. (2006) A brief tutorial on Maxent. AT&T Research.
- Phillips, S.J. y Dudík, M. (2008) Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, **31**, 161-175.
- Phillips, S.J., Dudík, M. y Schapire, R.E. (2017b) Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4. 1). *Biodiversity Informatics*.
- Quantum, G.I.S. (2016) Development Team (2016) Quantum Geographic Information System.
- R Core Team, R. (2019) R: A Language and Environment for Statistical Computing (ed RDC Team). R Foundation for Statistical Computing, 1, 409.
- Romo, H., Sanabria, P. y García-Barros, E. (2013) Predicción de los impactos del cambio climático en la distribución sobre las especies de lepidoptera. el caso del género *Boloria moore*, 1900 en la península Ibérica (Lepidoptera: Nymphalidae). *SHILAP Revista de lepidopterología*, **41**, 267-286.
- Sandel, B., Arge, L., Dalsgaard, B., Davies, R.G., Gaston, K.J., Sutherland, W.J. (2011) The influence of Late Quaternary climate-change velocity on species endemism. *Science*, **334**, 660-664.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación- SAyDS. (2015) Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., y Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American meteorological Society*, **93**(4), 485-498.
- Toranza, C., Brazeiro, A. y Maneyro, R. (2012) Efectos del cambio climático sobre la biodiversidad: El caso de los anfibios de Uruguay. *Cambio y Variabilidad Climática: Respuestas Interdisciplinarias (V. Picasso, G. Cruz, L. Astigarraga, and R. Terra, eds.)*. *Espacio Interdisciplinario, Uruguay*, 35-50.
- Toranza, C., Brazeiro, A. y Maneyro, R. (2016) Anfibios amenazados de Uruguay:

efectividad de las áreas protegidas ante el cambio climático. *Ecología austral*, **26**, 138-149.

Thrasher, B., Maurer, E. P., McKellar, C., y Duffy, P. B., 2012: Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3309-3314. [doi:10.5194/hess-16-3309-2012](https://doi.org/10.5194/hess-16-3309-2012)

Trond, H. L., Brehm, G., Navarrete, H., Franco, P., Gómez, H., Mena, J. L., Morales, V., Argollo J., Blacutt, L., y Canhos, V. (2012). Desplazamientos de los rangos de distribución y extinciones impulsados por el cambio climático en los Andes tropicales: síntesis y orientaciones. Herzog, S., Martínez, R., Jorgensen, Py Tiessen, H.(Eds) *Cambio Climático y Biodiversidad en los Andes Tropicales*. Paris: Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI), San José dos Campos, y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente (SCOPE).

Venier, M.P., Cosacov Martínez, A., López Lauenstein, D., Vega, C. y Verga, A. (2013) Impacto del cambio climático sobre la distribución de *Prosopis Hassleri* y *P. alba* en la región chaqueña.

Vichot-llano, A., Bezanilla-morlot, A., Martínez-castro, D. y Centella-artola, A. (2019) Estado actual de la aplicación de métodos de reducción de escala a las proyecciones de cambio climático en Centroamérica y el Caribe Present situation of the application of downscaling methods to the climate change projections in Central America and the C. , **25**, 218-237.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES GENERALES

Desde hace 20 años *P. alba* es promocionada para su uso en plantaciones comerciales a través del subsidio nacional que otorga la Ley 25.080, siendo en la actualidad una de las especies nativas más cultivada en Argentina con 9.000 hectáreas plantadas. A pesar de que en los últimos 10 años se ha avanzado en la obtención de material mejorado se desconoce gran parte del material genético (semillas) que dio origen a estas plantaciones, como así también el comportamiento de las fuentes semilleras frente al cambio climático. Por otro lado, el estudio de las adaptaciones de los materiales a las nuevas condiciones de sitios donde fueron trasladados es aún incipiente. El presente trabajo de tesis realizó un avance en estos interrogantes a través de la caracterización de la variación morfológica y adaptativa de poblaciones y progenies de *Prosopis alba* Grisebach del Parque Chaqueño argentino y Espinal frente al cambio climático.

La determinación de la distribución espacial natural actual de la especie y una caracterización climática de la distribución se abordó en el capítulo II. Los resultados mostraron que el uso de datos ambientales, registros de presencia de la especie y el modelo de nichos ecológicos predijo la distribución de la especie. El muestreo realizado en la región fitogeográfica del Espinal, junto con la recopilación bibliográfica de trabajos, tesis y bases de datos relacionadas a la especie definió la distribución actual de la especie. El reconocimiento y modelado de los patrones climáticos definidos por la presencia de *P. alba* permitió inferir el nicho de distribución actual de la especie. Se encontró que la distribución de *P. alba* está principalmente asociada a las variables bioclimáticas isothermalidad, precipitación del trimestre más cálido y precipitación del mes más seco, pero también influyen en su distribución las variables rango diario medio, temperatura media del trimestre más húmedo, y estacionalidad de precipitación. Se definieron 5 zonas climáticas homogéneas con las cuales es posible explicar la heterogeneidad ambiental de la distribución espacial de *P. alba* en la Argentina. Los resultados obtenidos en este capítulo definen los límites geográficos/ambientales para realizar potenciales forestaciones en el territorio argentino con buenas posibilidades de éxito.

En el capítulo III se abordan análisis morfológicos de las poblaciones muestreadas, se realiza una descripción de los suelos de cada población y se analizan las interacciones entre el componente edáfico y morfológico. La caracterización morfológica de las poblaciones de crecimiento espontáneo de la región fitogeográfica del Espinal diferenció dos grupos morfológicos, diferenciados en los caracteres de longitud de la pina, longitud del foliólulo, ancho del foliólulo, área foliar, distancia foliar, área total, y relación longitud/ancho del foliólulo. A su vez, los grupos morfológicos se diferencian en los requerimientos edáficos por la variable conductividad eléctrica. Por otro lado, también existió una concordancia entre los ordenamientos definidos por las variables edáficas y morfológicas. Se encontraron relaciones entre el área foliar de la hoja y las características edáficas de materia orgánica del horizonte 1 y porcentaje de arcilla. Estos resultados no solo realizan un avance en relación a investigaciones previas en las definiciones de ecotipos de *P. alba*, sino que también confirmaron que los estudios de suelo son un factor incidente en el crecimiento, desarrollo y caracterización del estrato arbóreo. A su vez, complementan los resultados obtenidos en el capítulo II, principalmente enfocados en estudios de conservación y reforestación, debiendo ser los ecotipos un factor a tener en cuenta en estos casos.

El capítulo IV analiza la variación adaptativa de la especie tanto en ensayo de progenie (primera parte del capítulo) como en laboratorio (segunda parte). Los resultados del ensayo de progenie indican que existe variación adaptativa según estrategias de brotación de las 88 familias de polinización abierta de *P. alba* introducidas en el ensayo de origen de Santa María en Santiago del Estero. Esta variación se diferencia en 3 grupos de brotación y 2 grupos de velocidad de brotación, y de la combinación de estas variables surgen 4 estrategias de brotación. Las variables temperatura media anual y del mes más frío diferencian los grupos de brotación y los de velocidad media de crecimiento de los brotes. Se evidencia la existencia de una estructura espacial diferencial tanto para los grupos de brotación (temprana, intermedia y tardía) como para los grupos de velocidad media de crecimiento de los brotes (rápida y lenta). A la vez, existe un patrón que relaciona los grupos de brotación con los grupos de velocidad media de crecimiento de los brotes, donde todos los orígenes que conforman el grupo de velocidad media de crecimiento de los brotes se encuentran dentro del grupo de brotación tardía. En base a estas conclusiones se sugiere que en

caso de transferencia de materiales genéticos de *P. alba* de un lugar a otro debiera considerarse la estrategia de brotación (combinación del grupo de brotación y grupo de velocidad media de crecimiento del brote) al cual pertenece la población, para que pueda adaptarse al lugar donde se realizará la plantación, de modo que la planta brote en un período en el que ya no exista riesgo de daño por evento climático geográfico no apto para la población.

Las evaluaciones de germinación, llevadas a cabo en laboratorio, demostraron que existe una respuesta diferencial de las poblaciones a diferentes condiciones de estrés hídrico y temperatura, por lo que habría evidencias de que esta variación es adaptativa. Existe una fuerte interacción entre los factores (temperatura, origen y potencial osmótico) que intervienen en la germinación de *Prosopis alba* cuando se somete a variaciones en estos factores. El comportamiento diferencial demuestra una variación adaptativa al momento de la germinación por origen. Las semillas del origen 8 (Pool noroeste de Córdoba), que representa el origen que crece en condiciones más árida de su zona de distribución, son las que mejor comportamiento tuvieron al ser sometido a estrés hídrico leve (potencial osmótico -0,8 MPa) en términos de cantidad de semillas germinadas a los 21 días, expresada en porcentaje. La alternancia de temperaturas 20-30 °C presenta mejores condiciones para germinar en todas las poblaciones. En concentraciones osmóticas de -1,2 MPa todos los orígenes de las semillas de *P. alba* presentaron similar valor de porcentaje de germinación (bajo, < 5 %). En relación a la variable largo radicular a los 20 días, la alternancia de temperatura 10- 35, fue la que permitió mayores valores.

El capítulo V analiza los posibles cambios en la distribución de *P. alba* bajo distintos escenarios futuros. Los resultados obtenidos en el capítulo demuestran que el modelo de *P. alba* proyectado a RCP 4.5 y 6.0 presenta cambios en las zonas de distribución, menores en RCP 4.5, con zonas donde aumentan (zona sur y oeste de la distribución) y otras donde disminuyen las probabilidades de presencia (zona norte y este), y mayores en RCP 6.0 donde la especie tiende a disminuir su probabilidad de presencia en toda su distribución actual. Ambas proyecciones (RCP 4.5 y 6.0) coinciden en que la zona NE de la distribución actual tiene a desaparecer en el futuro. Se delimitaron zonas donde la especie mantiene su ocupación en la proyección futura definidas como zonas prioritarias de conservación de la especie, como así también las

zonas donde la especie obtendrá los mejores porcentajes de germinación futura. Los análisis de la probabilidad de ocurrencia del desplazamiento muestran que si bien el corrimiento en los límites de distribución de la especie (horizontal y vertical) son mayor que los encontrados por otros autores, se encuentra dentro de los rangos descriptos.

Los resultados obtenidos dan respuesta a las dos hipótesis planteadas en la tesis: 1) *P. alba* es afectada por el cambio en las condiciones ambientales de su distribución, produciendo adaptaciones de las poblaciones de diferentes orígenes geográficos a nivel de fenología y germinación, y 2) Existen variables climáticas de mayor importancia en la definición de nicho actual de la especie, con las cuales es posible predecir la distribución futura cumpliendo el objetivo general

CONSIDERACIONES FINALES

Este trabajo representa un avance en cuanto al conocimiento existente de *P. alba* tanto en su distribución actual, capacidad adaptativa y proyección futura. En el transcurso de los seis años en los que se llevó a cabo este trabajo, la provincia de Córdoba lanzó el Plan Provincial Agroforestal (Ley 10.467) sancionada en agosto del 2017, que obliga a los productores a poseer una cubierta de copa entre el 2 y el 5 % de la superficie total de su campo. Una de las especies recomendadas en la presente ley según el Anexo II, es *Prosopis alba*, por lo que los avances obtenidos en la presente tesis deberán ser tenidos en cuenta por los productores que forestan, siendo el Banco Nacional de germoplasma de *Prosopis* y Vivero Forestal Educativo, ambos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, parte de los responsables de divulgar qué material de *P. alba* es conveniente utilizar según la región a forestar.

Otra implicancia de la presente tesis está en relación a la evaluación del material genético. Habiendo realizado una caracterización climática de la zona de distribución, y sumado esta caracterización a los morfotipos identificados para toda Argentina, analizar si todos estos morfotipos-ambientes están representados sería una buena forma de evaluación de la diversidad del germoplasma colectados y resguardado, siendo éste aspecto una potencial línea de investigación futura.

Continuar con los estudio de las adaptaciones a estrés hídrico en vivero y a campo de los materiales seleccionados es una línea de investigación interesante que ya se encuentra en marcha en su primer etapa (en vivero) en el marco del proyecto PROIINDIT “Obtención de Material Superior para la Forestación de la Provincia de Córdoba”. Por otro lado, es necesario continuar y profundizar con el estudio y evaluación de los escenarios climáticos futuros y sus implementaciones en la diversidad de modelos predictivos existentes en la actualidad.

Otros importantes avances logrados se encuentran en relación a la caracterización edáfica de los sitios de presencia de la especie para la región fitogeográfica del Espinal, así como también en el análisis de la interacción de este componente con el componente morfológico, donde los resultados obtenidos son un indicio de que deben existir estudios que amplíen las descripciones edáficas a lo largo de toda la zona de distribución de la especie y que profundicen las investigaciones que analizan las interacciones entre ambos factores. Estos estudios se planean como futuras líneas de investigación, como así también la exploración y análisis de las relaciones entre: morfología, clima y el componente edáfico.

Tanto los resultados obtenidos en la presente tesis como la bibliografía analizada señalan la importancia de continuar analizando las poblaciones de los bordes del rango de distribución, ya que dichas poblaciones son las más sensibles al cambio climático y las primeras en expresar cambios en los parámetros demográficos.

ANEXO 1

CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LOS MORFOTIPOS DE *P. alba*

Tabla 1. Caracterización morfológica de los morfotipos de *Prosopis alba* descritos por Verga *et al.* (2009), Verga (2014) y Marcó *et al.* (2016)

MF T	LP E	LPI	NFO L	NPI	LFO L	AFO L	APTO T	ARFO L	DIFO L	ARTOT	L_AFO L
BE	2,3 8	9,45	38,20	2,5 0	0,71	0,14	0,18	0,09	0,25	33,04	5,14
CS	2,2 6	9,84	41,60	2,2 0	0,60	0,11	0,20	0,06	0,24	23,21	5,39
ES	3,1 6	8,70	38,40	3,0 0	0,67	0,11	0,17	0,06	0,23	29,49	6,22
SG	3,6 0	8,70	33,50	1,9 0	0,90	0,15	0,17	0,12	0,26	29,48	5,86
SN	3,6 2	10,8 2	36,40	2,8 0	1,03	0,18	0,18	0,15	0,30	61,07	5,76

MFT: Morfotipo, Be: Bermejo o chaqueño, CS: Chaqueño Sur, ES: Espinal, SG: Santiagueño, SN: Salteño Norte

ANEXO 2

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO- QUÍMICAS DE LOS SUELOS MUESTREADOS

Caracterización de las propiedades físico- químicas de los suelos muestreados.

Los resultados de las determinaciones realizadas se muestran por perfil de suelo de cada sitio. Tabla 3 a 14.

Sitio 3: Río 1°

Coordenadas: -31,33427; -63,60470

Tabla 3. Resultados de las determinaciones edáficas en Río 1°.

Horizonte	Muestra 1			Muestra 2	
	Hz 1	Hz 2	Hz 3	Hz 1	Hz 2
Profundidad 1	0	30	44	0	37
Profundidad 2	30	44	60	37	60
Materia Orgánica (%)	3,52			3,19	
Arcilla 2 u (%)	13,71	13,44	12,46	19,57	21,55
Limo 2-50 u (%)	30,57	27,98	31,94	46,95	44,79
Arena > 50 u (%)	55,72	58,58	55,59	33,48	33,66
Clase Textural	Franco Arenoso	Franco Arenoso	Franco Arenoso	Franco	Franco
pH en Agua 1:2,5	6,68	7,54	6,64	5,92	5,98
CE (ms/cm)	0,27	0,38460	0,34110	0,10614	0,12770
Color en Húmedo	10YR3/2	10YR3/2	10YR2/2	10YR3/2	10YR2/2
Color en seco	10YR4/3	10YR4/3	10YR4/3	10YR5/3	10YR4/3

Sitio 4: Los Chañaritos

Coordenadas: -31,38257; -63,33420

Tabla 4. Resultados de las determinaciones edáficas en Los Chañaritos

Horizonte	Muestra 1			
	Hz 1	Hz 2	Hz 3	Hz 4
Profundidad 1	0	14	23	65
Profundidad 2	14	23	65	100
Materia Orgánica (%)	1,06			
Arcilla 2 u (%)	26,93	20,72		17,97
Limo 2-50 u (%)	64,16	66,31		70,41
Arena > 50 u (%)	8,91	12,97		11,61
Clase Textural	Franco Limoso	Franco Limoso		Franco Limoso
pH en Agua 1:2,5	7,04	6,39	7,04	8,18
pH hidrolítico				8,63
CE (ms/cm)	0,19	0,31	0,38	0,31
Color en Húmedo	10YR3/2	10YR3/2	10YR3/2	10YR4/3
Color en seco	10YR5/3	10YR5/3	10YR5/3	10YR5/4

Sitio 6: Parque San Martín

Coordendas: -31,72225; -60,33030

Tabla 5. Resultados de las determinaciones edáficas en Parque San Martín

	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3			
	Hz 1	Hz 2	Hz 1	Hz 2	Hz 1	Hz 2	Hz 3	Hz 4
Horizonte								
Profundidad 1	0	40	0	23	0	19	40	63
Profundidad 2	40	100	23	100	19	40	63	70
Materia Orgánica (%)	2,14		1,01		4,60			
Arcilla 2 u (%)	29,47		28,00		10,84	37,14	47,38	
Limo 2-50 u (%)	51,77		54,06		71,02	47,10	37,64	
Arena > 50 u (%)	18,76		17,94		18,14	15,76	14,98	
Clase Textural	Franco Arcillo Limoso		Franco Arcillo Limoso		Franco Limoso	Franco Arcillo Limoso	Arcilloso	
pH en Agua 1:2,5	7,99	8,19	7,93	7,82	6,32	5,75	5,09	5,64
pH hidrolítico		8,35						
CE (ms/cm)	0,27	0,28	0,35	0,50	0,86	0,37	1,03	0,82
Color en Húmedo	10YR4/2	10YR3/2	10YR3/2	10YR3/2	10YR3/2	10YR3/2	10YR3/3	10YR3/2
Color en seco	10YR6/3	10YR4/3	10YR5/2	10YR5/2	10YR3/3	10YR3/2	10YR4/2	10YR5/3

Sitio 7: Colonia Nueva

Coordenadas: -31,37303; -61,14898

Tabla 6. Resultados de las determinaciones edáficas en Colonia Nueva

	Muestra 1			Muestra 2		
	Hz 1	Hz 2	Hz 3	Hz 1	Hz 2	Hz 3
Horizonte						
Profundidad 1	0	7	57	0	7	
Profundidad 2	7	57	90	7	60	
Materia Orgánica (%)	2,15					
Arcilla 2 u (%)	14,05	22,32	32,99	19,90	25,65	
Limo 2-50 u (%)	81,76	74,75	64,16	71,81	68,68	
Arena > 50 u (%)	4,19	2,93	2,85	8,29	5,67	
Clase Textural	Franco Limoso	Franco Limoso	Franco Arcillo Limoso	Franco Limoso	Franco Limoso	
pH en Agua 1:2,5	8,58	9,52	9,28	10,10	10,16	
pH hidrolítico	8,04	9,88	9,75	9,73	9,84	
CE (ms/cm)	0,78	1,51	1,63	2,13	1,24	
Color en Húmedo	10YR3/2		10YR4/3	10YR3/2	10YR3/3	
Color en seco	10YR5/3	10YR5/3	10YR6/3	10YR4/3	10YR4/3	

Sitio 9: Parque de la Vida

Coordenadas: -31,44488; -64,22887

Tabla 7. Resultados de las determinaciones edáficas en el Parque de la Vida

	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Hz 1	Hz 2	Hz 1	Hz 2	Hz 1	Hz 2
Horizonte						
Profundidad 1	0	10	0	7	0	15
Profundidad 2	10	75	7	70	15	90
Materia Orgánica (%)	4,00		2,22		2,64	
Arcilla 2 u (%)	12,88	12,41	11,53	13,69	17,98	14,63
Limo 2-50 u (%)	55,57	61,47	34,53	40,88	51,26	63,10
Arena > 50 u (%)	31,55	26,12	53,94	45,43	30,76	22,27
Clase Textural	Franco Limoso	Franco Limoso	Franco Arenoso	Franco	Franco Limoso	Franco Limoso
pH en Agua 1:2,5	7,66	8,14	5,25	6,57	6,75	8,09
pH hidrolítico		8,12				8,18
CE (ms/cm)	0,51	0,35	0,27	0,54	0,44	0,39
Color en Húmedo	10YR3/3	10YR3/4	10YR3/2	10YR3/3	10YR3/2	10YR3/4
Color en seco	10YR5/3	10YR6/3	10YR5/3	10YR6/3	10YR5/3	10YR7/2

Sitio 10: Plaza de los Algarrobos

Coordenadas: -31,48110; -64,23647

Tabla 8. Resultados de las determinaciones edáficas en la Plaza de los Algarrobos

	Muestra 1	
	Hz 1	Hz 2
Horizonte		
Profundidad 1	0	4
Profundidad 2	4	40
Materia Orgánica (%)	5,22	
Arcilla 2 u (%)	20,17	26,56
Limo 2-50 u (%)	66,80	63,93
Arena > 50 u (%)	13,02	9,51
Clase Textural	Franco Limoso	Franco Limoso
pH en Agua 1:2,5	6,84	4,97
CE (ms/cm)	0,54	0,17
Color en Húmedo	10YR3/3	10YR3/2
Color en seco	10YR5/3	10YR5/3

Sitio 12: Frontera

Coordenadas: -31,16565; -62,75672

Tabla 9. Resultados de las determinaciones edáficas en Frontera

	Muestra 1		
	Hz 1	Hz 2	Hz 3
Horizonte	Hz 1	Hz 2	Hz 3
Profundidad 1	0	7	20
Profundidad 2	7	20	60
Materia Orgánica (%)	3,64		
Arcilla 2 u (%)	22,25	24,69	25,25
Limo 2-50 u (%)	66,87	63,43	63,19
Arena > 50 u (%)	10,89	11,88	11,56
Clase Textural	Franco Limoso	Franco Limoso	Franco Limoso
pH en Agua 1:2,5	4,87	5,21	5,42
CE (ms/cm)	0,27	0,12	0,29
Color en Húmedo	10YR3/2	10YR3/2	10YR3/2
Color en seco	10YR5/3	10YR5/3	10YR5/3

Sitio 13: Balnearia- Miramar

Coordenadas: -31,00990; -62,65378

Tabla 10. Resultados de las determinaciones edáficas en Balnearia- Miramar

	Muestra 1		
	Hz 1	Hz 2	Hz 3
Horizonte	Hz 1	Hz 2	Hz 3
Profundidad 1	0	15	40
Profundidad 2	15	40	100
Materia Orgánica (%)	2,05		
Arcilla 2 u (%)	24,63	35,00	34,36
Limo 2-50 u (%)	68,75	59,47	60,26
Arena > 50 u (%)	6,61	5,53	5,39
Clase Textural	Franco Limoso	Franco Arcillo Limoso	Franco Arcillo Limoso
pH en Agua 1:2,5	8,02	9,45	9,79
pH hidrolítico	8,1	9,71	9,96
CE (ms/cm)	0,46	1,15	1,21
Color en Húmedo	10YR3/3	10YR2/2	10YR3/3
Color en seco	10YR6/3	10YR5/2	10YR6/3

Sitio 15. Esperanza

Coordenadas: -31,38712; -60,89573

Tabla 11. Resultados de las determinaciones edáficas en Esperanza

	Muestra 1		
	Hz 1	Hz 2	Hz 3
Horizonte	Hz 1	Hz 2	Hz 3
Profundidad 1	0	11	17
Profundidad 2	11	17	100
Materia Orgánica (%)	2,44		
Arcilla < 2 u (%)	25,19	26,60	33,23
Limo 2-50 u (%)	57,25	50,80	48,34
Arena > 50 u (%)	17,56	22,60	18,43
Clase Textural	Franco Limoso	Franco Limoso	Franco Arcillo Limoso
pH en Agua 1:2,5	10,49	9,54	8,14
pH hidrolítico	10,4	9,7	8,15
CE (ms/cm)	1,38	1,23	0,86
Color en Húmedo	10YR4/2	10YR3/1	10YR3/1
Color en seco	10YR6/3	10YR5/2	10YR5/2

Sitio 16: Villa María

Coordenadas: -32,29173; -63,21867

Tabla 12. Resultados de las determinaciones edáficas en Villa María

	Muestra 1		Muestra 2
	Hz 1	Hz 1	Hz 2
Horizonte	Hz 1	Hz 1	Hz 2
Profundidad 1	0	0	40
Profundidad 2	20	40	70
Materia Orgánica (%)	3,73	2,34	
Arcilla < 2 u (%)	15,53	28,37	34,36
Limo 2-50 u (%)	69,10	59,49	59,80
Arena > 50 u (%)	15,37	12,15	5,84
Clase Textural	Franco Limoso	Franco Arcillo Limoso	Franco Arcillo Limoso
pH en Agua 1:2,5	5,61	6,46	8,37
pH hidrolítico			8,49
CE (ms/cm)	0,19	0,38	0,83
Color en Húmedo	10YR3/2	10YR3/2	10YR3/2
Color en seco	10YR5/3	10YR5/3	10YR4/3

Sitio 17: San Jerónimo de los Sauces

Coordenadas: -31,59885; -61,19940

Tabla 13. Resultados de las determinaciones edáficas en San Jerónimo de los Sauces

Muestra 1				
Horizonte	Hz 1	Hz 2	Hz 3	Hz 4
Profundidad 1	0	20	43	74
Profundidad 2	20	43	74	100
Materia Orgánica (%)	1,96			
Arcilla 2 u (%)	24,62	34,52	47,46	33,87
Limo 2-50 u (%)	71,03	61,72	49,10	62,13
Arena > 50 u (%)	4,34	3,78	3,44	4,00
Clase Textural	Franco Limoso	Franco Arcillo Limoso	Arcillo Limoso	Franco Arcillo Limoso
pH en Agua 1:2,5	7,87	8,36	8,72	8,88
pH hidrolítico		8,24	8,97	9,07
CE (ms/cm)	1,99	1,11	1,02	1,01
Color en Húmedo	10YR3/2	10YR3/2	10YR4/4	10YR4/3
Color en seco	10YR5/2	10YR4/2	10YR3/3	10YR5/4

Sitio 18: Colonia de Machado

Coordenadas: -31,42578; -63,58952

Tabla 14. Resultados de las determinaciones edáficas en Colonia de Machado

Muestra 1		Muestra 2		
Horizonte	Hz 1	Hz 2	Hz 1	Hz 2
Profundidad 1	0	30	0	30
Profundidad 2	30	60	30	60
Materia Orgánica (%)	4,61		3,65	
Arcilla 2 u (%)	20,38		20,80	16,27
Limo 2-50 u (%)	65,70		60,79	68,00
Arena > 50 u (%)	13,92		18,40	15,73
Clase Textural	Franco Limoso		Franco Limoso	Franco Limoso
pH en Agua 1:2,5	8,02	8,22	7,67	8,44
pH hidrolítico	7,97	8,02		8,54
CE (ms/cm)	0,25	0,15	0,48	0,26
Color en Húmedo	10YR3/2	10YR4/2	10YR3/2	10YR3/3
Color en seco	10YR5/3	10YR5/3	10YR5/2	10YR5/2

Sitio 19: Villa del Rosario

Coordenadas: -31,55733; -63,52222

Tabla 15. Resultados de las determinaciones edáficas en Villa del Rosario

	Muestra 1	
	Hz 1	Hz 2
Horizonte		
Profundidad 1	0	30
Profundidad 2	30	50
Materia Orgánica (%)	1,30	
Arcilla 2 u (%)	15,90	17,49
Limo 2-50 u (%)	57,34	62,75
Arena > 50 u (%)	26,76	19,76
Clase Textural	Franco Limoso	Franco Limoso
pH en Agua 1:2,5	7,92	8,51
pH hidrolítico		8,52
CE (ms/cm)	0,37	0,27
Color en Húmedo	10YR3/3	10YR4/2
Color en seco	10YR5/3	10YR5/3

Sitio 20: Ballesteros

Coordenadas. -32,56643; -63,00892

Tabla 16. Resultados de las determinaciones edáficas en Ballesteros

	Muestra 1		
	Hz 1	Hz 2	Hz 3
Horizonte			
Profundidad 1	0	16	52
Profundidad 2	16	52	100
Materia Orgánica (%)	4,04		
Arcilla 2 u (%)	28,18	42,14	24,14
Limo 2-50 u (%)	59,15	50,91	55,53
Arena > 50 u (%)	12,66	6,95	20,33
Clase Textural	Franco Arcillo Limoso	Arcillo Limoso	Franco Limoso
pH en Agua 1:2,5	8,59	9,89	9,74
pH hidrolítico	8,61	9,78	9,76
CE (ms/cm)	0,45	0,77	0,43
Color en Húmedo	10YR3/2	10YR3/2	10YR4/3
Color en seco	10YR5/2	10YR5/2	10YR6/3

Sitio 21: Bell Ville

Coordenadas: -32,62813; -62,70158

Tabla 17. Resultados de las determinaciones edáficas en Ballesteros

	Muestra 1	
	Hz 1	Hz 2
Horizonte	Hz 1	Hz 2
Profundidad 1	0	19
Profundidad 2	19	60
Materia Orgánica (%)	1,62	
Arcilla 2 u (%)	20,17	18,56
Limo 2-50 u (%)	41,65	66,13
Arena > 50 u (%)	38,18	15,30
Clase Textural	Franco	Franco Limoso
pH en Agua 1:2,5	6,67	8,37
pH hidrolítico		8,49
CE (ms/cm)	0,24	0,25
Color en Húmedo	10YR3/2	10YR3/2
Color en seco	10YR5/3	10YR5/3

Sitio 22: Cintra

Coordenadas: -32,33622; -62,78065

Tabla 18. Resultados de las determinaciones edáficas en Cintra

	Muestra 1	
	Hz 1	Hz 2
Horizonte	Hz 1	Hz 2
Profundidad 1	0	22
Profundidad 2	22	26
Materia Orgánica (%)	3,10	
Arcilla 2 u (%)	15,39	
Limo 2-50 u (%)	74,32	
Arena > 50 u (%)	10,30	
Clase Textural	Franco Limoso	
pH en Agua 1:2,5	8,91	9,14
pH hidrolítico	8,65	9,05
CE (ms/cm)	0,87	0,66
Color en Húmedo	10YR3/2	10YR3/3
Color en seco	10YR5/3	10YR6/3