



**UNIVERSIDAD DE PINAR DEL RÍO**  
**“HERMANOS SAÍZ MONTES DE OCA”**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AGROPECUARIAS**  
**DEPARTAMENTO FORESTAL**

**CAMBIOS EN LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE PINARES DEL OCCIDENTE**  
**DE CUBA EN DIFERENTES ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

**Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Forestales**

**CARLOS ALBERTO MIRANDA SIERRA**

**Pinar del Río**  
**2017**

**UNIVERSIDAD DE PINAR DEL RÍO  
"HERMANOS SAÍZ MONTES DE OCA"**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AGROPECUARIAS  
DEPARTAMENTO FORESTAL**

**CAMBIOS EN LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE PINARES DEL OCCIDENTE  
DE CUBA EN DIFERENTES ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

**Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Forestales**

**Autor: MSc. Carlos Alberto Miranda Sierra**

**Tutor: Dr. C. Gretel Geada López**

**Pinar del Río  
2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi tutora que me ha sabido guiar en toda la trayectoria de este trabajo con un elevado nivel de compromiso profesional y una gran voluntad.

A todo el colectivo de profesores del Doctorado Curricular Colaborativo en Ciencias Forestales de la Universidad Hermanos Saíz Montes de Oca que me ha brindado apoyo incondicional desde el inicio.

A mis compañeros del Doctorado Curricular Colaborativo que me dieron mucho ánimo y entusiasmo en esta difícil tarea.

A mis compañeros del Centro Meteorológico Provincial de Pinar del Río y del Instituto de Meteorología que me han apoyado incondicionalmente.

## **DEDICATORIA**

A mis padres, que con mucho amor me trajeron al mundo, con tanta ternura me han educado y cuidado y con mucha preocupación han estado expectantes de cada resultado en mi vida.

A mis hijos y esposa, que este trabajo sea un ejemplo de sacrificio y humildad para alcanzar un fin.

A todas aquellas personas que de forma desinteresada me han dado confianza y apoyo en esta investigación, especialmente a mi tutora.

A esos que espero confíen en la ciencia, apliquen estos resultados en la práctica para así obtener mejores resultados en el sector forestal.

## SÍNTESIS

Con el propósito de proyectar los cambios y posibles impactos en la distribución de hábitats potenciales para los pinares en el occidente de Cuba bajo diferentes escenarios de cambio climático, se empleó la técnica de modelación de distribución de especies con los algoritmos MaxEnt Y BIOCLIM. A partir de la georreferenciación de 1851 rodales naturales de *Pinus caribaea* var. *caribaea* y de *Pinus tropicalis* y los datos del clima actual y futuro, se estimaron las áreas con aptitudes ambientales alta media y baja, siendo estas últimas muy superiores al área ocupada en la actualidad. El algoritmo MaxEnt con los datos del Modelo Climático Regional PRECIS-CARIBE, mostró mejor desempeño en sus predicciones de cambios e impactos. A mediano y largo plazo se espera una reducción y un ligero desplazamiento al Este de los nichos climáticos potenciales para *Pinus caribaea* en Pinar del Río e Isla de la Juventud, para *Pinus tropicalis*, que tiene áreas de aptitud ambiental alta mayor, se estima un incremento y desplazamiento al Oeste de sus nichos ecológicos en Pinar del Río, pero sin condiciones climáticas favorables en la Isla de la Juventud. Se proyecta impactos mayores en áreas que hoy son fuentes semilleras de *Pinus caribaea* var. *caribaea*.

## ÍNDICE

	Pág.
<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>10</b>
1.1 Clima y cambio climático	10
1.1.1 El clima en la región occidental de Cuba	10
1.1.2 El cambio climático global	13
1.1.3 Variabilidad del clima en Cuba	15
1.2 Evaluación del cambio climático en el sector forestal en Cuba	19
1.3 Modelación de la distribución potencial de las especies	25
1.4 Aplicaciones de las modelaciones de hábitats en plantas y animales	31
<b>CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>34</b>
2.1 Georreferencia de pinares naturales en el occidente de Cuba	34
2.2 Definición de la línea base	35
2.3 Modelación de hábitats potenciales bajo diferentes escenarios de cambio climático	39
2.4 Evaluación del posible impacto del cambio climático en la distribución potencial de las especies	40

<b>CAPÍTULO 3. DISTRIBUCIÓN POTENCIAL ACTUAL DE PINARES EN EL OCCIDENTE DE CUBA</b>	<b>42</b>
3.1 Distribución de hábitats potenciales en la actualidad (línea base)	42
3.1.1 Predicción de las aptitudes ambientales y áreas nuevas sobre la base del clima observado para <i>Pinus caribaea</i>	42
3.1.2 Predicción de las aptitudes ambientales y áreas nuevas sobre la base del clima observado para <i>Pinus tropicalis</i>	53
<b>CAPÍTULO 4. MODELACIÓN DE HÁBITAT POTENCIAL DE PINARES EN EL OCCIDENTE DE CUBA EN DIFERENTES ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO</b>	<b>62</b>
4.1 Predicción de hábitats potenciales para los pinares de <i>Pinus caribaea</i> y <i>Pinus tropicalis</i> en diferentes escenarios de cambio climático	62
4.1.1 Predicción de hábitats potenciales para diferentes RCP en <i>Pinus caribaea</i>	62
4.1.2 Predicción de hábitats potenciales para diferentes RCP en <i>Pinus tropicalis</i>	64
4.2 Predicción de hábitats potenciales con SRES A2 y B2 a partir del modelo climático regional PRECIS-CARIBE en el occidente de Cuba	68
4.2.1 Predicción de hábitats potenciales para <i>Pinus caribaea</i>	68
4.2.2 Predicción de hábitats potenciales para <i>Pinus tropicalis</i>	72
4.3 Impacto del cambio climático en la disponibilidad de hábitats para pinares de <i>Pinus caribaea</i> y <i>Pinus tropicalis</i> en el occidente de Cuba	76

4.3.1 Predicción de los impactos del cambio climático para diferentes RCP a partir del modelo climático global HadGEM-ES (CMIP5)	76
4.3.1.1 Predicción de impactos del cambio climático en la distribución de <i>Pinus caribaea</i>	76
4.3.1.2 Predicción de impactos del cambio climático en la de <i>Pinus tropicalis</i>	78
4.3.2 Predicción de los impactos del cambio climático a pinares de <i>Pinus caribaea</i> y <i>Pinus tropicalis</i> para diferentes escenarios de emisiones (SRES) a partir del modelo climático regional PRECIS-CARIBE	80
4.3.2.1 Predicción del impacto a <i>Pinus caribaea</i> para los SRES A2 y B2	80
4.3.2.2 Predicción del impacto a <i>Pinus tropicalis</i> para los SRES A2 y B2	85
4.4 Algunas medidas de adaptación ante los efectos del cambio climático en los pinares del occidente de Cuba	92
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>97</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>98</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Distribución espacial de los rodales de pinares naturales de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> (A) y <i>Pinus tropicalis</i> (B)	<b>35</b>
Figura 2. Distribución actual (puntos) y potencial de hábitats de <i>Pinus caribaea</i> en el occidente de Cuba con algoritmo BIOCLIM, base de datos del clima mundial 1960–1990	<b>42</b>
Figura 3. Representación del modelo MaxEnt de la probabilidad de distribución potencial de <i>Pinus caribaea</i> en Cuba (A). Clasificación a aptitud ambiental del modelo de distribución potencial (B). Modelo climático Global CCM <sub>3</sub> , base de datos del clima mundial 1960-1990	<b>44</b>
Figura 4. Curva operacional (ROC) del modelo para <i>Pinus caribaea</i> , serie clima observada 1981-2010	<b>46</b>
Figura 5. A-Distribución de las probabilidades de hábitats potenciales actuales de <i>Pinus caribaea</i> ; B-Mapa de aptitud ambiental del modelo con serie 1981-2010	<b>47</b>
Figura 6. Importancia relativa de cada variable bioclimática al modelo para <i>Pinus caribaea</i> , mediante la prueba de <i>jackknife</i>	<b>49</b>
Figura 7. Contribución de cada variable climática al modelo generado con MaxEnt para <i>Pinus caribaea</i>	<b>51</b>

Figura 8. Distribución actual (puntos) y potencial de hábitats de <i>Pinus tropicalis</i> en el occidente de Cuba con algoritmo BIOCLIM, base de datos del clima mundial 1960–1990	54
Figura 9. Representación del modelo MaxEnt de la probabilidad de distribución potencial de <i>Pinus tropicalis</i> en Cuba (A). Clasificación a aptitud ambiental del modelo de distribución potencial (B). Modelo climático Global CCM <sub>3</sub> , base de datos del clima mundial 1960-1990	55
Figura 10. Curva operacional (ROC) del modelo para <i>Pinus tropicalis</i> , serie clima observada 1981-2010	56
Figura 11. A- Distribución de las probabilidades de hábitats potenciales actuales de <i>Pinus tropicalis</i> ; B- Mapa de aptitud ambiental del modelo con serie 1981-2010	57
Figura 12. Importancia relativa de cada variable bioclimática al modelo para <i>Pinus tropicalis</i> , mediante la prueba de <i>jackknife</i>	60
Figura 13. Contribución de cada variable climática al modelo generado con MaxEnt para <i>Pinus tropicalis</i>	61
Figura 14. Comportamiento pronosticado de la aptitud ambiental de <i>Pinus caribaea</i> para los RCP 4,5, 6,0 y 8,5 en los años 2050 y 2070	63
Figura 15. Comportamiento pronosticado de la aptitud ambiental de <i>Pinus</i>	

<i>tropicalis</i> para los RCP 4,5, 6,0 y 8,5 de los años 2050 y 2070	<b>65</b>
Figura 16. Aptitud ambiental estimada para los pinares de <i>Pinus caribaea</i> en el occidente de Cuba con PRECIS-CARIBE (ECHAM4) para los escenarios SRES A2 y SRES B2	<b>69</b>
Figura 17. Total de área con aptitudes ambientales potenciales para <i>Pinus caribaea</i> con el modelo PRECIS-CARIBE, A. SRES A2, B. SRES B2	<b>71</b>
Figura 18. Aptitud ambiental estimada para los pinares de <i>Pinus tropicalis</i> en el occidente de Cuba, con PRECIS-CARIBE (ECHAM4) para SRES A2 y SRES B2	<b>73</b>
Figura 19. Total de área con aptitudes ambientales potenciales para <i>Pinus tropicalis</i> . Modelo PRECIS-CARIBE, A. SRES A2, B. SRES B2	<b>75</b>
Figura 20. Impactos del cambio climático esperados a los hábitats potenciales de <i>Pinus caribaea</i> para diferentes RCP 4,5; 6,0 y 8,5	<b>77</b>
Figura 21. Impactos del cambio climático esperados a los hábitats potenciales de <i>Pinus tropicalis</i> para diferentes RCP 4,5; 6,0 y 8,5	<b>79</b>
Figura 22. Impacto esperado en los pinares de <i>Pinus caribaea</i> a partir del modelo PRECIS-CARIBE para los escenarios SRES A2 y SRES B2 en el occidente de Cuba	<b>81</b>
Figura 23. Distribución por áreas de impacto (hectáreas) en <i>Pinus caribaea</i>	

para los escenarios: A. SRES A2, B. SRES B2 en el occidente de Cuba	<b>84</b>
Figura 24. Diferencias en áreas de impactos (hectáreas) proyectadas en <i>Pinus caribaea</i> para los escenarios SRES A2 y B2 en los años 2030, 2050, 2070, 2099.	<b>85</b>
Figura 25. Impacto esperado en los pinares de <i>Pinus tropicalis</i> a partir del modelo PRECIS-CARIBE para los escenarios SRES A2 y SRES B2 en el occidente de Cuba	<b>87</b>
Figura 26. Distribución por áreas de impacto (hectáreas) en <i>Pinus tropicalis</i> para los escenarios: A. SRES A2, B. SRES B2	<b>89</b>
Figura 27. Diferencias en áreas de impactos (hectáreas) proyectadas en <i>Pinus tropicalis</i> para los escenarios SRES A2 y B2 en los años 2030, 2050, 2070, 2099.	<b>90</b>
Figura 28. Unidades técnicas de los programas de mejoramiento genético de <i>P.c</i> ( <i>Pinus caribaea</i> ); <i>P.t</i> ( <i>Pinus tropicalis</i> ): 1-La Grifa; 2-La Pimienta; 3-Cabeza de Horacio; 4-Mina Dora; 5-La Manaja; 6-Malas Aguas; 7-Estación Experimental Viñales; 8-Ceja del Negro; 9-Galalón; 10-Marbajita; 11-Cajálbana; 12-El Caimito	<b>94</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Estimación del área con aptitud ambiental en hectáreas (ha) de <i>Pinus caribaea</i> para el período observado 1981-2010	<b>48</b>
Tabla 2. Estimación del área con aptitud ambiental en hectáreas (ha) de <i>Pinus tropicalis</i> para el período observado 1981-2010.	<b>58</b>

## LISTADO DE ANEXOS

Anexo 1. Probabilidad de nicho climático para los pinares de *Pinus caribaea* en la isla de Cuba. Ensamblajes del Modelo Climático Global HadGEM-ES para RCP 4,5; 6,0 y 8,5 de los años 2050 y 2070

Anexo 2. Probabilidad de nicho climático para los pinares de *Pinus tropicalis* en la isla de Cuba. Ensamblajes del Modelo climático global HadGEM-ES para RCP 4,5; 6,0 y 8,5 de los años 2050 y 2070

## INTRODUCCIÓN

El cambio y variabilidad climática en la actualidad constituye uno de los principales problemas ambientales que presenta la humanidad y Cuba no está exenta a ello. Los estudios han demostrado, que en el área geográfica del Caribe en las últimas décadas, los procesos de circulación atmosférica regional se han estado presentando complejas manifestaciones de la variabilidad natural del clima (IPCC, 2002; 2007; 2007a; 2007b). Lo más significativo ha sido el incremento de la influencia anticiclónica sobre el área, la temperatura superficial del aire se ha incrementado en 0,9°C, condicionada ante todo por el ascenso de la temperatura mínima (1,9°C) desde la segunda mitad del siglo XX. Los valores de precipitación anual muestran un ligero pero continuo incremento de las anomalías positivas, dado esto por un ligero incremento de las lluvias en el período estacional poco lluvioso y anomalías positivas en el período estacional lluvioso (Centella-Artola et al., 2001; ECLAC, 2010; Pérez-Suarez *et al.*, 2011; Karmalkar *et al.*, 2013).

Los eventos de sequía han registrado un significativo incremento en su frecuencia e intensidad, que pudiera propiciar el agotamiento de los suelos y la disminución de las aguas subterráneas, más dañinos aún si estos estuvieran acompañados de posteriores eventos de intensas precipitaciones (Lapinel-Pedroso *et al.*, 2006; Cutié-Cancino *et al.*, 2013). Se ha observado además un incremento en la formación de huracanes en el

Océano Atlántico, así como de huracanes intensos (Ballester-Pérez *et al.*, 2009), aunque esto no puede atribuirse al cambio climático.

A partir de las evidencias inequívocas de los rápidos cambios observados en el clima, se hizo necesario estimar las variaciones del clima a futuro que, con el uso de Modelos Climáticos Globales y Regionales se obtuvieron resultados predictivos del comportamiento de las variables climáticas hasta finales del siglo XXI. Estos resultados sugieren que sobre Cuba en términos generales debe continuar aumentando la temperatura superficial del aire, más acentuado en el período poco lluvioso, y una disminución de las precipitaciones en el período lluvioso (Centella-Artola *et al.*, 1997; 2001; 2008).

Por la extraordinaria importancia que tienen los pinares del occidente de Cuba para los programas de reforestación y debido a su adaptación a diferentes condiciones edafoclimáticas y la calidad de su madera para múltiples propósitos han sido *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barrett y Golfari (pino macho) y *Pinus tropicalis* Morelet (pino hembra), las especies forestales que han recibido la gran atención en los programas de reforestación, así como en los trabajos de mejora genética sobre todo *Pinus caribaea*. Estas investigaciones se iniciaron en la segunda mitad de los años sesenta que incluyó la selección, tratamiento y mejora a los principales rodales semilleros, seguidos del establecimiento de pruebas de procedencia, bancos clonales y pruebas de progenie.

El área geográfica donde estas especies aparecen, es normalmente una fracción del área que potencialmente podrían ocupar. La reducción o dilatación del área de distribución actual respecto al área de distribución potencial se debe a un complejo conjunto de causas, tanto naturales como antropogénicas. Entre las primeras figuran factores abióticos



(topográficos, geológicos y climáticos), como bióticos (competencia interespecífica, capacidad de dispersión). Las áreas ocupadas en la actualidad por los pinares en el occidente de Cuba desde hace muchos años han sido intensamente antropizadas, por lo que hoy existen rodales reducidos en comparación con la distribución potencial que ambas especies pudieran ocupar.

Los bosques de pinos o pinares son una formación vegetal de suma importancia económica y ecológica, cuyas especies dominantes pertenecen al género *Pinus* (familia Pinaceae). Este género lo componen 110 especies, cuatro de estas se desarrollan en Cuba (Farjon y Styles, 1997; Geada-López *et al.*, 2002; Geada-López *et al.*, 2003; Gernandt *et al.*, 2005) con una distribución vicariante, es decir, *Pinus tropicalis* y *Pinus caribaea* en el occidente; y *Pinus cubensis* y *Pinus maestrensis* en el oriente de Cuba.

En los lugares donde se debilita la competencia de la vegetación latifolia, pueden predominar los pinares de forma natural, formando una vegetación condicionada por el fuego, el suelo extremadamente pobre y/o por el clima, llegando a ser un *paraclimax sensu Tüxen*.

*Pinus caribaea* y *Pinus tropicalis* predominan en las Alturas de Pizarras, las cuales están constituidas por la Formación San Cayetano, que consiste en series de arenisca y lutitas de color blanco rojizo o gris blancuzo compuestas de cuarzo con cemento limonítico. Los suelos por lo general son del tipo Ferralítico Cuarcítico Amarillo montañosos típicos poco profundos y secos, erosionados y esqueléticos típicos, muchos de ellos escabrosos, donde se destaca que ha existido una erosión y lixiviación muy fuerte. Por otra parte, en la llanura suroccidental el suelo está constituido por suelos arenosos cuarcíticos, conocidos

como “arenas blancas” (Samek y Del Risco-Rodríguez, 1989).

Ambas especies comparten en ocasiones parte de su área de distribución con condiciones climáticas bastante similares. Prefieren un régimen pluviométrico estacional con lluvias medias anuales entre 1 700 y 2 000 mm, con un período lluvioso que se extiende desde mayo hasta octubre cuando se acumula el 75% del total de lluvia anual y otro, poco lluvioso, que abarca los meses de noviembre a abril con el 25% restante. La temperatura media anual oscila entre 22°C y 25°C.

Sobre estos pinares naturales podría esperarse impactos causados por el incremento de la temperatura, la disminución de las lluvias y de la humedad. Acompañado esto de un incremento de los eventos de sequía, que aumentaría a su vez la ocurrencia de incendios forestales. Unido a todo esto, si se espera que los huracanes sean más frecuentes e intensos, entonces propiciarían importantes daños mecánicos a estos bosques, además de las plagas y enfermedades oportunistas que pudieran atacarlos y afectarlos (Álvarez-Brito *et al.*, 1998; 2004; Álvarez-Brito y Mercadet-Portillo, 2011; 2014).

En Cuba los intentos realizados por predecir los impactos del cambio climático en el sector forestal, se han enfocado principalmente en realizar estimaciones a partir de la pérdida de áreas forestales por el ascenso del nivel medio de mar estimado en el futuro, cambios en los rendimientos de resina en *Pinus caribaea*, peligro de aparición de plagas forestales así como los impactos por el aumento de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> (Álvarez-Brito *et al.*, 1998; 2004; Ajete-Hernández *et al.*, 2006; Mercadet-Portillo y Álvarez-Brito, 2006).

Los ajustes al cambio climático estarán determinados por la duración de cambio impuesto como proceso ecológico, la capacidad del reajuste fisiológico a estas condiciones

determinará su plasticidad y esto a largo plazo establecerá su distribución ante las nuevas condiciones cambiantes (Matyás *et al.*, 2010). En principio, la vulnerabilidad de una especie al cambio climático es una combinación de la escala del análisis y de la capacidad genética de las poblaciones de una especie determinada (Aitken *et al.*, 2008; Moritz y Agudo, 2013), por lo que el nivel de afectación dependerá del tamaño de las áreas de distribución actual (nicho realizado), como resultado de las características ecológicas y geográficas (Aitken *et al.*, 2008).

Broennimann *et al.*, (2006) reportaron que las especies que podrían ser afectadas por el calentamiento global serían las que ocupan mayores áreas de distribución. Sin embargo, otros trabajos han demostrado que no hay relación entre el tamaño del área y la afectación debido al cambio climático (Zank *et al.*, 2014), pues la capacidad de resiliencia está determinada por la estructura genética de las poblaciones. Es por ello, que en los últimos cinco años se trabaja enfocado hacia un manejo forestal adaptado a las proyecciones del clima futuro (Ledig *et al.*, 2010; Guisan *et al.*, 2013; Rehfeldt *et al.*, 2015; Koo *et al.*, 2015). Rehfeldt *et al.*, (2015) apunta a que se necesita una integración del manejo tradicional acompañado de las predicciones de cambio del clima, es decir, hacia el aumento de la resiliencia en poblaciones y ecosistemas facilitando o asistiendo la migración (Sáenz-Romero, 2014) de las unidades de manejo forestal, basados en estrategias de *no-regrets* (Vose *et al.*, 2012; Koo *et al.*, 2015; Rehfeldt *et al.*, 2015).

Mediante los mapas y los inventarios es posible conocer el área de distribución actual de una especie. El fundamento de los modelos de distribución potencial (MDP) de especies, es utilizar el área de distribución actual como muestra para estimar el área de distribución

potencial, usando un conjunto de variables climáticas que puedan explicar dichas distribuciones. La distribución potencial sería una representación geográfica tendiente a simbolizar el conjunto de localidades con condiciones físicas y climáticas similares a las existentes en aquellas en las que se tiene presencia de la especie.

El uso de los modelos de distribución potencial de especies (MDE) constituye una herramienta empírica, robusta, repetible y fácil de utilizar, que puede ayudar a identificar potenciales zonas a conservar y/o restaurar (Phillips *et al.*, 2004; 2006; Elith y Leathwick, 2009; Phillips y Dudik, 2010; Guisan *et al.*, 2013; Guillera *et al.*, 2015). Un MDE es básicamente una caracterización de las condiciones ambientales adecuadas para las especies, que ayuda a identificar dónde están espacialmente ubicados los sitios que cumplen con los requisitos adecuados para supervivencia (Phillips *et al.*, 2004; 2006; Pearson, 2007; Merow *et al.*, 2013; Latif *et al.*, 2014).

Un ejemplo dentro de las diversas aplicaciones de los MDE, combinado con herramientas como los Sistemas de Información Geográfica y los mapas generados de distribución actual y potencial, es que sirven para la priorización de zonas con iniciativas de conservación biológica, restauración ecológica y estrategias de adaptación en el sector forestal que involucre la restauración de hábitats, la reforestación y la protección forestal (Elith *et al.*, 2006; Ledig *et al.*, 2010; Gray y Hamann, 2012; Guisan *et al.*, 2013).

La necesidad de realizar estrategias proactivas, diseñadas para anticiparse y responder a los impactos del cambio del clima, promueve una intervención deliberada en los procesos naturales, con el objetivo de incrementar la capacidad de los ecosistemas forestales de sobrevivir y funcionar a un nivel aceptable para los humanos (Scholes *et al.*, 2014). Tales

estrategias deben estar primeramente enfocadas en reducir las vulnerabilidades de los ecosistemas y su recuperación forzada (Spittlehouse y Stewart, 2004), sin embargo, no siempre se observan ejemplos concreto para desarrollarlas y desplegar planes reales y prácticos (Rehfeldt *et al.*, 2015).

Es por ello, que en la visión del proceso de comprensión de los impactos potenciales del cambio climático, primeramente debe existir conciencia de que este proceso puede manejarse enfocado a determinados recursos forestales (Janowiak *et al.*, 2014; Rehfeldt *et al.*, 2015). Posteriormente los decisores pueden destinar los limitados recursos donde sean más eficaces, es decir, implementar resiliencia y tácticas recuperativas donde las amenazas son más graves, asistir la migración donde emergen nuevos hábitats o dirigir las conductas tradicionales donde las especies pueden persistir.

En la actualidad ya se comienzan a hacer estudios de manejo forestal adaptado al cambio climático (Sáenz-Romero, 2014; Rehfeldt *et al.*, 2015; Koo *et al.*, 2015) como resultado de más de diez años en la modelación con MDE. En Cuba existen estudios de hábitats potenciales para determinadas especies animales (Fong-Grillo, 2009; Azor-Hernández y Barro-Cañamero, 2014), no obstante sobre el impacto del cambio climático solo se cuenta con la aproximación en anfibios de Cobos-Cobos (2016). Sin embargo, estudios sobre los hábitats potenciales y sus cambios por el cambio climático, en especies forestales que definen una formación vegetal, todavía son muy incipientes (Geda-López y Miranda-Sierra, 2016; Miranda-Sierra *et al.*, 2016; 2017).

De esta manera el **problema científico** se centra en **¿Cómo se modifica la distribución potencial de hábitat de pinares del occidente de Cuba en los diferentes escenarios de**

**cambio climático?**, para lo cual el **objeto de investigación** son los pinares en el occidente de Cuba.

Sobre la base a los elementos expuestos se formula la **hipótesis** siguiente: Los pinares de ambas especies, verán reducidas sus condiciones de hábitats en los diferentes escenarios y modelos de cambio climático.

Por tanto, el **objetivo general** es proyectar los cambios en la distribución de hábitats potenciales para los pinares del occidente de Cuba, bajo el efecto de diferentes escenarios de cambio climático, por medio de los objetivos específicos siguientes:

1. Determinar la relación clima-distribución actual de los pinares en el occidente de Cuba.
2. Modelar la distribución de hábitats de pinares del occidente de Cuba ante los diferentes escenarios de cambio climático.
3. Evaluar los posibles cambios espaciales e impactos en los pinares del occidente de Cuba para diferentes escenarios climáticos.

La **novedad científica** radica en la identificación de las variables climáticas mejores predictoras de hábitats potenciales para las especies *Pinus caribaea* var. *caribaea* y *Pinus tropicalis*. La modelación de hábitats potenciales de pinares a partir del clima actual y de las proyecciones de cambio climático y la predicción de la distribución de áreas potenciales para la reforestación y conservación orientadas a la adaptación al cambio climático. La evaluación del impacto con diferentes escenarios de cambios climático para cada una de las especies que determinan la formación pinares.

El **aporte científico**: Modelos de hábitats potenciales de pinares naturales del occidente de Cuba, a partir de las proyecciones de cambio climático.

El **aporte práctico** radica en los mapas de distribución geográfica de hábitats potenciales de pinares en las condiciones actuales y futuras a corto (2030), mediano (2050-2070) y largo plazo (2099). Mapas de distribución potencial e impactos a la distribución de hábitats por efecto del cambio climático. Proyecciones de áreas para la reforestación y conservación de pinares a corto, mediano y largo plazo. Medidas de adaptación específicas para *Pinus caribaea* var. *caribaea* y *Pinus tropicalis*.

## **CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **1.1 Clima y cambio climático**

#### **1.1.1 El clima en la región occidental de Cuba**

El desarrollo de las especies está fuertemente asociado a las condiciones climáticas de una región determinada. El clima según el Vocabulario Meteorológico Internacional (OMM, 1966) se define como el conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, caracterizado por los estados y evolución del tiempo en una porción determinada del espacio, y constituye uno de los elementos del sistema climático que mayor incidencia tiene en la distribución y la ecología de las especies.

Las condiciones climáticas en Cuba están fuertemente influenciadas por su posición geográfica, muy próxima al Trópico de Cáncer y por su fisiografía. Todo esto condiciona un clima cálido bajo la influencia estacional de fenómenos meteorológicos tanto tropicales como extratropicales. Debido a factores geográficos, la forma estrecha y alargada de Cuba, rodeada por el mar y sin grandes sistemas montañosos, le permite un suavizamiento apreciable a la marcha de las principales variables climáticas.

Existen múltiples clasificaciones bioclimáticas para determinar el clima de Cuba. La clasificación bioclimática de la Tierra (Rivas-Martínez *et al.*, 2011), considera el clima de Cuba como macrobioclima tropical, bioclima pluvial e hiperoceánico, con pisos bioclimáticos termotropical y subhúmedo. La clasificación de Gausen lo estima como clima tropical,



Subtipo subhúmedo, con 1-2 meses secos, es una transición hacia el clima tropical húmedo lluvioso. Sin embargo, la clasificación más ampliamente utilizada es la clasificación de Köppen (modificada), que define el clima en Cuba como del tipo cálido tropical, con estación lluviosa en el verano. Sin embargo, en el país se reporta también la presencia de otros tipos climáticos como clima de tipo tropical húmedo de selva, lluvioso durante todo el año y clima tropical relativamente seco con pocas lluvias (Vega *et al.*, 1987).

Los sistemas biológicos son comúnmente definidos como la interacción de distintos subsistemas en los cuales se encuentra el patrimonio o el genofondo de las especies, su interrelación con el clima y con los componentes del suelo. Por tanto, se puede decir que se forma una triada donde existe bajo un clima determinado cierta distribución de determinadas especies. Una especie puede expandirse o contraerse en función de las limitantes, ya sean climáticas, edáficas o por factores intrínsecos dentro del propio sistema. Por ende, el clima constituye uno de los subsistemas más importantes, el cual está definido por un conjunto de variables en las que su importancia no se debe a una u otra variable aislada, sino a la sinergia de todas ellas en su conjunto. El clima como subsistema, permite entonces predecir la distribución y la presencia actual de determinadas especies (Araújo *et al.*, 2004; Araújo y Guisan, 2006; Aitken *et al.*, 2008; Contreras-Medina *et al.*, 2010).

El clima en Cuba es regularmente uniforme, sin grandes barreras geográficas que determinen grandes contrastes, aunque resulta paradójico el alto nivel de endemismo de la flora. La biota cubana posee elementos de la flora norteamericana, centroamericana y del oriente suramericano, es decir, existe una confluencia importante de varios factores que no solo el clima es quien lo determina.

Durante el año se presenta un período lluvioso que se extiende de mayo a octubre, que coincide con el verano, los meses más cálidos son julio y agosto. En este período cae alrededor del 74% de la lluvia anual (1 035 mm). El período poco lluvioso se extiende desde noviembre hasta abril y cae el otro 26% de las lluvias anuales (360 mm) (Cutié-Cancino *et al.*, 2013). La temperatura media anual varía desde 24,2°C en las zonas llanas hasta 22,3°C en las zonas montañosas de la Cordillera de Guaniguanico en la región occidental de Cuba.

Existe un grupo de autores que han descrito la fitogeografía de Cuba relacionada con el clima, entre ellos Samek y Travieso (1968) quienes dicen que en el mapa bioclimático correspondiente a los tipos de vegetación el clima de Cuba occidental es tropical, con épocas secas y húmedas bien pronunciadas. Por otro lado, el mapa bioclimático confeccionado por Borhidi y Muñiz en 1980, distinguen características climáticas de las áreas que ocupan los pinares, semejante a un bioclima Thermoxerochiménico de la variedad “seco”, con 5 o 6 meses secos, clima que es favorable para la expansión y progresión de los pinares.

Samek y Del Risco-Rodríguez, (1989) en sus estudios de sucesión, detallan que los pinares existentes en la zona occidental están determinados por una sucesión que queda truncada debido principalmente a características edáficas ya que el suelo no retiene agua, aunque también argumentan el papel del fuego en este paraclimax. Sin embargo, más tarde Del Risco-Rodríguez y Reyes-Domínguez, inédito; reconocen que adicionalmente a lo antes expuesto, los periodos largos de sequía pudieran ser determinantes para la no ocurrencia de pinares. Por cuanto el clima constituye uno de los factores que determinan la permanencia y la distribución de las especies en Cuba (Figuroa-Sierra, 2002).

### **1.1.2 El cambio climático global**

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) entiende como cambio climático *“cualquier cambio en el clima a lo largo del tiempo, ya sea debido a la variabilidad natural o como resultado de una actividad humana”* (IPCC, 2002; 2014).

El clima de la Tierra ha estado cambiando constantemente debido a la actividad solar, el movimiento de los continentes, cambios en la órbita de la Tierra, períodos de baja y alta actividad volcánica y ciclos interglaciales. Durante los últimos 4 millones de años el clima terrestre ha pasado de un período glacial a interglacial. El período interglacial Eemian hace 130 mil años atrás, era más caluroso que hoy, y el nivel del mar era entre 4 y 6 m más alto de lo que es ahora, indicando una desglaciación mayor que la actual. La presente interglaciación (Holoceno) comenzó hace alrededor de unos 10 mil años y se extiende hasta nuestros días (Hambrey y Harland, 1981; Rieu, 2007).

Estos períodos de cambio climático como fenómeno natural, que ocurren cíclicamente, han estado condicionando períodos de extinción y aparición de nuevas especies, así como procesos de expansión y colonización de nuevas áreas para gran parte de las especies (Kukla, 2005). Sin embargo, en los últimos 150 años rápidos y más frecuentes cambios se han producido en las variables climáticas del planeta, sobre todo desde mediados del siglo pasado, debido a la variabilidad natural del clima y a un elevado aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, producto de las actividades humanas (IPCC, 2001). Otros factores de carácter antrópico también afectan al sistema climático, como son las emisiones de contaminantes, aerosoles y modificaciones de

la superficie terrestre (urbanización, deforestación), según refiere la Organización Meteorológica Mundial en el reporte sobre el Estado del Clima Mundial (OMM, 2013). Ha sido tan pronunciada la magnitud de la influencia antrópica, que en la actualidad algunos científicos proponen llamar esta Era como “Antropoceno” en sustitución del Holoceno, ya que refleja más explícitamente el impacto social del hombre y sus descubrimientos en el sistema climático (Crutzen y Stoemer, 2000; Schmidt *et al.*, 2004; Zalasiewicz, 2008).

De esta manera, lo que parece ser un denominador común son los cambios originados por la actividad antrópica, que acelera aún más los procesos de variabilidad y cambio climático. Existen evidencias que revelan según el 4<sup>to</sup> Informe de Evaluación del IPCC (2007 a; b) “... *el calentamiento del sistema climático es inequívoco...; ... ha sido el más cálido jamás registrado desde que se empezaron a realizar mediciones en la época moderna, hacia 1850...*”. *En promedio el nivel de los océanos mundiales ha aumentado a 3.1 mm/año, en parte por la dilatación térmica y el deshielo de los glaciares. La superficie afectada por las sequías ha aumentado desde el decenio de 1970, así como un aumento de la actividad ciclónica tropical intensa en el Atlántico Norte...*” En los últimos años se ha intensificado el debate científico acerca de este problema, sus causas, impactos y estrategias para enfrentarlo.

En la actualidad la capacidad de predecir con antelación las variaciones climáticas, ofrece la posibilidad de poder actuar a tiempo y reducir sus impactos adversos, además de adaptarse a los efectos de la variabilidad del clima. El incremento de la preparación ante eventos climáticos extremos contribuye notablemente a la reducción de la vulnerabilidad. Es por ello que, entre las estrategias globales para enfrentar el problema del cambio climático, están la

**mitigación:** relacionada esta con la reducción de los GEI y con la absorción de estos gases, mediante la captura biológica por los llamados “*sumideros*”, o la captura geológica en depósitos subterráneos u oceánicos. En este caso los bosques desempeñan un importante papel en relación al CO<sub>2</sub>.

Una segunda estrategia es la **adaptación:** proceso de ajuste de los sistemas humanos o naturales en respuesta a impactos climáticos actuales o esperados, para atenuar los efectos perjudiciales, o aprovechar los que resultan beneficiosos (IPCC, 2014). Este es el reto mayor y más costoso, sobre todo para los países en desarrollo, especialmente los insulares, incluyendo a Cuba (IPCC, 2014).

### **1.1.3 Variabilidad del clima en Cuba**

Las observaciones de las estaciones en el área del Caribe muestran un calentamiento estadísticamente significativo, lo cual tendrá implicaciones en el desarrollo económico de los países caribeños, Cuba no será una excepción (Centella-Artola *et al.*, 2008; Jury, 2009; Karmalkar *et al.*, 2013).

En Cuba los estudios de evaluación de la variabilidad del clima se realizaron a partir de 1980 en el Instituto de Meteorología, cuando se empieza a detectar algunas anomalías en las variables climáticas (Vega *et al.*, 1987), tendencia opuesta entre las precipitaciones de las estaciones seca y lluviosa así como tendencias muy positivas en una serie de temperaturas superficiales en algunas localidades (Pérez-Suárez *et al.*, 2011). Posteriormente se confirma la existencia de tendencias significativas en otra serie de variables climáticas (Lapinel-Pedroso *et al.*, 1993; Centella-Artola *et al.*, 1997; Naranjo-Díaz y Centella-Artola, 1997). Las primeras evaluaciones sobre la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en Cuba se

desarrollaron bajo el proyecto de investigación “Impactos del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba” (Gutiérrez-Pérez *et al.*, 2000), donde se hizo un análisis integral de los impactos del cambio climático y de las medidas de adaptación en Cuba en los siguientes sectores: recursos hídricos; zonas costeras y recursos marinos; agricultura y silvicultura; asentamientos humanos; biodiversidad y vida silvestre y salud humana.

El impacto del cambio climático en la actividad forestal comienza a ser evaluado con los primeros trabajos en la década del 1990, que finalmente aparecen resumidos en el libro “El sector forestal cubano y el cambio climático” en el año 2011 (Álvarez-Brito y Mercadet-Portillo, 2011) y se continúa trabajando en esta línea de investigación. Sin embargo, no tuvieron en consideración estudiar cómo variaría la distribución de especies forestales impactadas por el cambio climático basados en métodos de modelación matemática.

Los estudios realizados en Cuba y en la región del Caribe han demostrado un incremento en la temperatura, cambios en la distribución temporal de las precipitaciones, frecuencia de afectación de eventos climáticos extremos como las lluvias intensas y las tormentas locales severas, incremento de la frecuencia de eventos de sequía (Lapinel-Pedroso *et al.*, 2006; Ballester-Pérez *et al.*, 2009; Solomon *et al.*, 2007). El comportamiento observado en el clima de Cuba durante las últimas cuatro décadas es consistente y sugiere la existencia de una variación importante en la década de los años 70 del pasado siglo. Todo esto fue detallado en la Primera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (Centella-Artola *et al.*, 2001).

Ante la urgencia de poder prevenir, mitigar o adaptarse, y por las limitaciones que representan los modelos globales y regionales, es que aparece como alternativa estimar el

comportamiento del clima futuro en el área del Caribe, tarea muy compleja por las condiciones insulares. Esto se realizó con ayuda del sistema de modelación climática regional PRECIS-CARIBE (ECLAC, 2010; Karmalkar *et al.*, 2013), modelo ampliamente utilizado en el mundo para el desarrollo de escenarios de cambio climático a nivel regional y el estudio de extremos (Kotroni *et al.*, 2008; Islam *et al.*, 2009; Marengo *et al.*, 2009). Esta opción fue y continúa siendo resultado de la colaboración y esfuerzos para el desarrollo de escenarios regionales iniciados en el 2003 entre cuatro países (Belice, Cuba, Jamaica y Barbados). Detalles del PRECIS ver en Taylor *et al.*, (2007).

Para el caso de Cuba fueron usados dos escenarios de emisiones (SRES) A2 y B2 considerados estos como plausibles representaciones de futuras emisiones de gases de efecto invernadero, basados en un coherente y consistente desarrollo económico y demográfico, así como de los cambios tecnológicos en la región del Caribe (Nakicenovic y Swart, 2000; Centella-Artola *et al.*, 2001; 2008) caracterizados por:

- SRES A2 (describe un mundo muy heterogéneo. El desarrollo económico tiene una orientación principalmente regional y el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos).
- SRES B2 (describe un mundo en el que se hace hincapié en las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Se trata de un mundo cuya población mundial crece continuamente, a un ritmo menor al de la línea evolutiva A2, con niveles medios de desarrollo económico y cambios tecnológicos menos rápidos. Orientado hacia la protección ambiental y la equidad social, se centra en los niveles local y regional).

Más adelante, en el informe de la Segunda Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático en Cuba (República de Cuba, 2015), se pone de manifiesto una vez más el considerable peso de la adaptación al cambio climático y se incorporan nuevos elementos para su mitigación. Evidencias observacionales demostraron los cambios del clima en el país (Pérez-Suárez *et al.*, 2011) por el aumento de:

- La temperatura superficial del aire en 0,9°C; condicionado por el aumento de la temperatura mínima promedio en 1,9°C, produciendo una disminución en la oscilación diaria de la temperatura desde la segunda mitad del siglo XX.
- La frecuencia de sequías largas y severas, especialmente en verano.
- Las precipitaciones en el período poco lluvioso, y la disminución en los meses lluviosos; y aumento de la lluvia asociada a grandes precipitaciones en invierno.
- La ocurrencia de inundaciones costeras moderadas y fuertes, con independencia de los eventos meteorológicos que las generan.

Las indiscutibles evidencias de las rápidas variaciones del clima que están sucediendo en Cuba y las perspectivas, conlleva a la propuesta de nuevas medidas y programas para el enfrentamiento al cambio climático. Las más importantes están relacionadas con el uso y manejo adecuado de los suelos; ahorro, uso y protección de las aguas; uso de tecnologías no contaminantes de la atmósfera; protección y conservación de los ecosistemas más vulnerables y de las especies; especialización de la reforestación y logro de un adecuado ordenamiento forestal e incremento de los índices de supervivencia y de logro de las plantaciones forestales; manejo sostenible de tierras, uso de buenas prácticas e investigaciones para la obtención de variedades resistentes a condiciones climáticas



extremas; protección a los manglares, vegetación costera vulnerable y manejo integrado de las costas (Álvarez-Brito *et al.*, 1998, 2004; Ajete-Hernández *et al.*, 2006; Álvarez-Brito y Mercadet-Portillo, 2011).

La corrida de las proyecciones del clima futuro para Cuba, basadas en dos modelos climáticos (ECHAM4 y HadCM3) para dos escenarios de emisiones futuras SRES A2 y B2, son resultados relativamente recientes con cierto margen de incertidumbre. Es por ello que, la aplicación de estos modelos, junto con la modelación de la distribución de las especies, pudiera representar una nueva aproximación valiosa al estudio de la vegetación en Cuba.

### **1.2 Evaluación del cambio climático en el sector forestal en Cuba**

La tasa de cambio climático puede ser proyectada; sin embargo, estos cambios pueden ser mucho más rápidos que en los sistemas naturales y por tanto, pueden responder a un cuasi equilibrio existente entre la distribución de las especies y el clima (Rehfeldt *et al.*, 1996; Davis *et al.*, 2005). Es por ello que los ajustes estarán determinados por el tiempo entre los procesos ecológicos que vayan a suceder en el espacio causa y efecto, y puede estar determinado por las especies más cercanas a su rango de tolerancia, que tienen que cambiar su fisiología a una velocidad que quizás no puedan. Por tanto, la plasticidad de las especies va a determinar su subsistencia o no.

Es reconocido por muchos autores (Álvarez-Brito y Mercadet-Portillo; 2011; Janowiak *et al.*, 2014; Rehfeldt *et al.*, 2015) que es una necesidad del sector forestal comprender el cambio climático, poder modelar la predicción del mismo y definir cuáles son las especies involucradas sobre todo las económicamente importantes, su plasticidad para poder prevenir y determinar acciones de mitigación y adaptación rápida.

Los ecosistemas forestales son sistemas dinámicos en los que ocurren complejas interacciones entre los organismos bióticos y abióticos y no están exentos a los impactos de los cambios que se están sucediendo en el clima. Existe una creciente literatura referente a los impactos del cambio climático sobre la abundancia y la distribución de las especies; sin embargo, aún existe incertidumbre en cuanto a la magnitud de sus efectos. Estos cambios en el clima están ocurriendo de manera acelerada, en comparación con los plazos requeridos para la adaptación de las especies y este hecho repercutirá en un acelerado cambio en el rango de especies, extinción y desequilibrio de la dinámica de los ecosistemas (Hansen *et al.*, 2001).

Hoy existen serias afectaciones en los bosques naturales y las plantaciones debido a problemas con la calidad de la mayoría de estos, como consecuencia del inadecuado manejo y explotación en etapas anteriores, problemas con las fuentes de semillas, con la actualización de la ordenación forestal, insuficiente tratamiento silvicultural e inadecuada selección de especies (Figuroa-Sierra, 2002; Álvarez-Brito y Mercadet-Portillo, 2011).

En Cuba, con la participación de diferentes instituciones se han realizado varias aproximaciones del impacto del cambio climático en el sector forestal (Álvarez-Brito *et al.*, 1998; 2004; Ajete-Hernández *et al.*, 2006; Ortiz-Álvarez, 2010; Álvarez-Brito y Mercadet-Portillo, 2011, basados en las proyecciones del clima futuro realizados por el Instituto de Meteorología. Se hicieron varios estudios de caso, donde se estimaron los impactos del ascenso del nivel medio del mar esperado sobre el patrimonio forestal en varias Empresas Agroforestales (EAF) a lo largo del país consideradas muy vulnerables. Los resultados arrojaron que para los diferentes escenarios y salidas de los modelos, se producirá la pérdida

y afectación de gran parte del patrimonio forestal, sobre todo ecosistemas de manglar y bosques semidecíduos a partir del 2030 y hasta el 2100 en la Empresa Forestal Integral (EFI) Península de Guanahacabibes en Pinar del Río (hoy esta denominación de Empresa Forestal Integral se sustituye por EAF) se afectará alrededor del 51% del área actual, en la EAF Mayabeque, al Sur de la Habana (84% del patrimonio de la empresa) por el efecto combinado de la surgencia provocada por huracanes de gran intensidad y la sobre elevación del nivel del mar; en la EAF Victoria de Girón en la Ciénaga de Zapata, Matanzas, EAF Villa Clara y en el Área protegida Delta del Cauto, en este último se esperan las mayores penetraciones del mar y con ello importantes afectaciones a los ecosistemas costeros por el nivel tan bajo del terreno.

Sin embargo, estas son aproximaciones que no contienen información sobre la ecología y dinámica poblacional, ni la plasticidad de las especies fundamentales que están en los ecosistemas presentes. Por cuanto, no permiten una evaluación sobre la capacidad biológica de las especies y su vulnerabilidad.

Otros impactos esperados en el sector forestal han sido expuestos en la Segunda Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático de la República de Cuba (2015). En este caso se tienen en cuenta los impactos derivados de la temperatura del aire, la disminución de las lluvias, el aumento del nivel medio del mar y el incremento de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>. Los impactos esperados son los siguientes por:

**Aumento de la temperatura del aire:** Modificación de los patrones fenológicos de algunas especies. Pérdida de la biodiversidad en algunas formaciones forestales. Aceleración de los ciclos reproductivos anuales de plagas, aumentando el potencial destructivo de los bosques.

**Aumento de la temperatura del aire y modificación del régimen de lluvias:** inversión en el rendimiento medio anual de la producción de resinas de *Pinus caribaea* var *caribaea*. Riesgo de muerte regresiva del bosque.

**Aumento del nivel medio del mar y ciclones tropicales:** pérdida significativa de superficie forestal y volumen de madera. Afectación severa a la biodiversidad.

**Aumento de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>:** mayor nivel de productos combustibles en el bosque, aumentando el peligro de incendios y en consecuencia, una explosión de perforadores de la corteza. Incremento de la relación nitrógeno/carbono podría aumentar el consumo de follaje por los insectos. Retención neta de carbono inicialmente de los bosques de coníferas en el occidente del país que alcanzará su valor máximo para luego disminuir o invertirse, convirtiéndose en fuente de emisión, presentando además reducciones en sus rendimientos.

**Plagas:** aumento de la vulnerabilidad al cambio climático de las plagas forestales. Variación de las áreas de distribución, poblaciones y efectos de las plagas ya establecidas. Ingreso de especies exóticas que invadan los ecosistemas forestales.

No obstante, este proceso ha sido muy complejo ya sea por la escasa información previa de la fisiología de cada especie y la estructura genética de sus poblaciones como dispersión de los puntos de medición de la información climática. Lo cual no permite evaluar, en toda su

magnitud la capacidad de las especies involucradas para dar respuestas a los pronósticos esperados.

El sector forestal cubano ha identificado dentro de la estrategia para la **mitigación** de los efectos del cambio climático, algunas medidas encaminadas a reducir las emisiones de GEI, orientadas estas hacia el incremento del área boscosa a partir de una política de reforestación en todo el país en un 35% hasta el año 2050; el secuestro de carbono a partir del tiempo de uso de los productos maderables, ya sea por el estudio de la cantidad de carbono que pudiera ser removido por las plantaciones o por los bosques; y la sustitución de los combustibles fósiles, mediante el empleo de la biomasa forestal.

Otras estrategias de mitigación fueron propuestas a las EAF, orientadas fundamentalmente a modificaciones en el sistema de gestión empresarial, considerando la necesidad de incrementar significativamente hasta duplicar el área de plantación anual; elevar el logro de las plantaciones; reducir el número de áreas que pudieran ser afectadas por incendios; reducir la tala rasa y aumentar el incremento medio anual de los bosques naturales y de las plantaciones, así como el cambio de categoría de bosques productores a bosques de conservación, se incrementa el carbono retenido en esas áreas debido a que las talas se circunscriben solamente a las establecidas por el plan de manejo para esta categoría, y hace que el bosque mejore su rendimiento y salud. Otras acciones no menos importantes fueron evaluadas para su implementación, como el uso de la agroforestería, dirigida al control de la erosión, disminución de pérdida de nutrientes y del escurrimiento superficial de los suelos, la selección de árboles de rápido crecimiento y un ciclo óptimo de rotación de los cultivos, medidas estas que están en concordancia con las propuestas del IPCC para aquellos países

insulares en desarrollo más vulnerables a los impactos del cambio climático (Álvarez-Brito *et al.*, 2004, Mercadet-Portillo y Álvarez-Brito, 2006; Ajete-Hernández *et al.*, 2006; Álvarez-Brito y Mercadet-Portillo, 2011; Planos-Gutiérrez *et al.*, 2013).

Por otra parte, la estrategia de **adaptación** para enfrentar los impactos del cambio climático en el sector forestal es una tarea muy ardua y costosa, sustentada en un enfoque integrado del reconocimiento de los cambiantes peligros, vulnerabilidades y riesgos que se van sucediendo a medida que avanza la variabilidad del clima junto al impacto antropogénico. Algunas de las principales medidas de adaptación propuestas como resultado de diversos proyectos e investigaciones, van dirigidas a establecer reservas *in situ* y *ex situ* de especies forestales claves con el objetivo de asegurar la disponibilidad de un banco genético, reforzar el monitoreo de los bosques naturales y plantaciones, crear un sistema de monitoreo de plagas y enfermedades, trabajar en la prevención de los incendios forestales, el mejoramiento de la salud del bosque a través de la silvicultura y el manejo integrado de plagas (Álvarez-Brito *et al.*, 1998; Centella-Artola *et al.*, 2001; Ortiz-Álvarez, 2010; Álvarez-Brito y Mercadet-Portillo, 2011; República de Cuba, 2015).

No obstante, gran parte de los estudios han estado restringidos o no han tomado en consideración los nichos y áreas de determinadas especies, su dinámica y su autoecología. Estos no han descrito cómo van a variar las áreas de hábitats potenciales de una especie en función del cambio climático, su autoecología y la capacidad de resiliencia de las poblaciones y el ecosistema.

De esta manera si se modela en función de las variables del clima, sus proyecciones de cambio y la presencia de las especies, se pudieran predecir otros hábitats disponibles, por

tanto, se contaría con una herramienta mucho más poderosa para estos estudios. En Cuba estos han estado muy limitados, y aquellos destinados a la predicción (Fong-Grillo, 2009; Azor-Hernández y Barro-Cañamero, 2014; Cobos-Cobos, 2016; Geada-López y Miranda-Sierra, 2016;\_Miranda-Sierra *et al.*, 2016, 2017) pudieran representar un punto de partida para el sector forestal de acumulación de datos para la planificación de manejos a ecosistemas más grandes.

### **1.3 Modelación de la distribución potencial de las especies**

A nivel internacional ya existen pruebas que el cambio climático está afectando los ecosistemas y a los organismos. Una de las respuestas de las especies al cambio climático son los desplazamientos tanto en altitud como en latitud (Solomon *et al.*, 2007). Este movimiento de las especies ha sido estimado a diferentes escalas y regiones, principalmente por medio de la modelación climática de las especies (*species climate enveloped models*) (Rehfeldt *et al.*, 2015). En todos los casos las especies experimentan un desplazamiento potencial notable para el futuro, en relación con el presente.

Conceptualmente uno de los aspectos más importantes es el nicho ecológico, utilizado en estudios de conservación de la biodiversidad. Aunque se han formulado diferentes definiciones aún hoy en evolución, este se refiere básicamente al espacio en el ambiente que ocupa una especie en condiciones naturales donde la especie puede desarrollarse (Puliam, 2000). La definición generalmente aceptada distingue entre un nicho fundamental y un nicho realizado. Un nicho fundamental es el rango de condiciones ambientales en las que en teoría puede vivir una especie, mientras que el nicho realizado se define por la combinación de interacciones negativas (como competencia y depredación) que restringen la presencia de

una especie y de interacciones positivas (como facilitación) que amplían los rangos ambientales en los que la especie puede crecer. En general, ambos nichos son considerados nichos grinnelianos (subconjunto del espacio compuesto por variables no interactivas con una especie. Se trata de condiciones dentro de las cuales una especie sobrevive o no) (Grinnell, 1917; Austin, 2007; Barve *et al.*, 2011; Joyce y Rehfeldt, 2013).

La vulnerabilidad de una especie al cambio del clima depende de la combinación de su genofondo y de la intensidad con que se producen los procesos de variabilidad climática en un área determinada, es decir, de las características ecológicas y geográficas. Swihart *et al.*, (2003) y Broennimann *et al.*, (2006) afirman que las especies marginales (aquellas en las que sus requerimientos climáticos no coinciden con la media de los que se encuentran en el área de estudio) deben ser más sensibles al cambio del clima, que aquellas cuyos requerimientos climáticos se acerquen más a los que son comunes en el área analizada. Además, encontraron que las especies que podrían ser menos afectadas por el calentamiento global serían las de mayor amplitud de nicho ecológico (que podría traducirse en mayores áreas de distribución).

Las especies de pinos ubicadas en el occidente de Cuba pudieran ser consideradas especies marginales, debido a que desarrollan ahí porque la sucesión no puede continuar, de lo contrario serían reemplazadas. Es por ello, la importancia de comprenderlas y estudiarlas, para conocer el impacto que pudiera tener el cambio climático en su futura distribución.

Cuando se habla de distribución de hábitats deben distinguirse dos categorías diferentes: la real (también llamada ocurrencia) y la potencial. La distribución real se refiere a los sitios en los que se han observado o colectado individuos, y la potencial hace alusión a las áreas que



tienen condiciones ambientales muy similares a los sitios donde se encuentran las especies y que tienen muy altas probabilidades de estar ocupadas por estas mismas (Elith y Leathwick, 2009; Gámez, 2011).

Mediante los mapas y los inventarios es posible conocer el área de distribución actual de una especie. El fundamento de los modelos de distribución potencial (MDP) de especies, es utilizar el área de distribución actual como muestra para estimar el área de distribución potencial, usando un conjunto de variables climáticas que puedan explicar dichas distribuciones. La distribución potencial sería una representación geográfica tendiente a simbolizar el conjunto de localidades con condiciones físicas y climáticas similares a las existentes en aquellas en las que se tiene presencia de la especie.

La predicción de la distribución geográfica de las especies es primordial en diversas aplicaciones de la ecología, evolución, planeamiento, conservación y la predicción (Ferrier, 2002), también para la comprensión de determinantes ecológicos y evolutivos de los patrones espaciales de la biodiversidad (Beamont *et al.*, 2005; Graham *et al.*, 2006; Townsend *et al.*, 2007; Kumar y Stohlgren, 2009; Sáenz-Romero *et al.*, 2011; Escobar *et al.*, 2014).

Los modelos de distribución de especies (MDE) intentan proveer una predicción detallada de la distribución de las especies a partir de la presencia relativa o la abundancia según los predictores ambientales. Se expresa como un mapa que representa lo adecuado o inadecuado del territorio para la presencia de la especie en una escala continua que suele ajustarse al rango 0-1 (0: incompatible, 1: idóneo). Que un punto del terreno tenga un valor próximo a 1, significa que las variables descriptivas en ese punto son muy similares a las que

existen en las zonas de presencia actual de la especie por lo que, en ausencia de otros factores, ese lugar puede considerarse compatible para el taxón.

Estos modelos se han convertido en herramientas elementales que utilizan los investigadores en la exploración de diferentes incógnitas en la ecología, evolución y conservación. Estiman la relación entre la presencia de las especies en los sitios y las características medioambientales y/o espaciales de esos sitios. En las últimas dos décadas su utilización ha tenido un gran auge en la biogeografía, la conservación, la biología y ecología (Elith *et al.*, 2011).

La mayoría de los estudios sobre técnicas de MDE, se han enfocado en la creación de modelos usando datos de presencia/ausencia o abundancia de especies. Esos datos en su mayoría corresponden a registros de solo presencia ubicados en los museos, colecciones de herbarios cada vez más accesibles de manera digital (Elith *et al.*, 2006, García-Roselló *et al.*, 2014). El incremento de la accesibilidad a estas bases de datos, a las distintas capas ambientales con varias resoluciones espaciales, así como a las imágenes generadas por satélites (Turner, 2003; Howard *et al.*, 2012) es hoy más frecuente y están disponibles, lo que posibilita una mejora en la precisión de los resultados.

En la actualidad existen diferencias en los métodos de los MDE, sobre todo en la forma de mostrar las respuestas, la selección de los predictores más relevantes, el peso de las contribuciones de la variable, interacciones permitidas y la predicción de los patrones geográficos de ocurrencia (Guisan y Thuiller, 2005).

Existen diversos algoritmos estadísticos, los cuales, con el concurso de los Sistemas de Información Geográfica, permiten elaborar hipótesis de distribución de especies a partir de

los datos disponibles y la información de las distintas variables ambientales. Algunos de estos algoritmos conocidos como: BIOCLIM, BRT, BRUTO, DK-GARP, DOMAIN, GAM, GDM, GLM, GDM-SS, LIVES, MARS, MARS-COM, MARS-INT, MAXENT, MAXENT-T, OM-GARP y se agrupan en dos grandes grupos (Elith *et al.*, 2006; 2011) de acuerdo con el tipo de datos que usan: aquellos que usan solo datos de presencia e incluyen un estilo-envolvente (BIOCLIM) y el método de doble distancia (DOMAIN y LIVES). El segundo grupo son aquellos que caracterizan el ambiente con la muestra, e incluyen algunas aproximaciones a la regresión. Los modelos lineales de generalización (GLMs, por su sigla en Inglés) y los modelos aditivos de generalización (GAMs, por su sigla en Inglés) poseen potentes raíces estadísticas y la habilidad de mostrar en la realidad la relación entre los modelos ecológicos (Austin, 2007).

El modelo **BIOCLIM**: denominado “Envoltura bioclimática”, averigua el rango climático/topográfico de las zonas de presencia para cada variable, y calcula la distribución potencial de dicha especie en lugares con rangos climáticos y topográficos similares (percentiles de los valores más probables) (Nix, 1986; Busby, 1991; Beamont, 2005). El modelo **DOMAIN**: calcula el parámetro estadístico “distancia de Gower” para cada celda en el mapa. El número resultante es multiplicado por 100. Las zonas con las mejores condiciones de habitabilidad de la especie tendrán un número alto (superior a 95). El resultado es un mapa probabilístico (Carpenter *et al.*, 1993).

Entre los modelos estadísticos está el **GARP** (*Genetic Algorithm for Rule Set Prediction*) es un algoritmo genético para la predicción basada en conjuntos de reglas. Utiliza un método basado en inteligencia artificial para modelar el nicho ecológico de especies usando la ocurrencia de puntos y datos ambientales. Trata, de forma iterativa, de encontrar las

correlaciones entre los datos de presencia de la especie estudiada con los parámetros ambientales, utilizando cuatro reglas diferentes: atómica, regresión logarítmica, envoltura bioclimática y negación de la envoltura bioclimática (Townsend *et al.*, 2007).

Por último, el modelo de aprendizaje cibernético **MaxEnt**: programa que modela la distribución geográfica de las especies, utilizando como datos solo los sitios de presencia de esa especie y las variables climáticas y topográficas asociadas a cada uno de esos puntos de presencia. Para modelar las distribuciones se basa en el principio de máxima entropía, en el cual el modelo obtenido revela la probabilidad relativa de distribución de una especie en todas las cuadrículas o celdas en el espacio geográfico definido, donde un valor de alta probabilidad asociado a una cuadrícula particular, indica la probabilidad de la misma de tener condiciones ambientales favorables para la especie modelada (Elith *et al.*, 2006). El algoritmo MaxEnt, versión 3.3.3 fue desarrollado en el laboratorio AT&T de Texas, la Universidad de Princeton y el Museo Americano de Historia Natural (Phillips *et al.*, 2004; 2005; Phillips y Dudik, 2010).

Algunas de las ventajas de MaxEnt son: 1) Requiere solo datos de presencia, en conjunto con variables ambientales. 2) Puede usar tanto datos continuos como categóricos y puede incorporar interacciones entre distintas variables. 3) Utiliza eficientes algoritmos que han sido desarrollados para garantizar convergencia en una óptima (entropía máxima) distribución probabilística. 4) La distribución probabilística de MaxEnt tiene una definición matemática concisa (Phillips *et al.*, 2004; 2006; Elith *et al.*, 2006; 2011; Morales, 2012; Merow *et al.*, 2013).

El resultado final es una expresión del tipo:

$$P(x) = \frac{\exp(C1 * F1(x) + C2 * F2(x) + C3 * F3(x) \dots)}{Z}$$

Donde= C1, C2...Cn, son constantes; F1, F2...Fn, son las variables climáticas y Z es una constante que asegura que la suma de todos los valores de P para todas las celdas sea igual a 1.

Pese a que los modelos de distribución de especies *per se* son dependientes de un buen número de asunciones e incertidumbres (Warren y Seifert, 2011) que a su vez se ven incrementadas cuando son proyectados sobre escenarios futuros (Guisan y Thuiller, 2005; Thuiller *et al.*, 2009). Estos constituyen uno de los pocos procedimientos disponibles para anticipar los efectos del cambio climático sobre la distribución actual y potencial de las especies (karmalkar *et al.*, 2013; Sáenz-Romero, 2014; Rehfeldt *et al.*, 2015; koo *et al.*, 2015).

#### **1.4 Aplicaciones de las modelaciones de hábitats en plantas y animales**

Como se señalaba anteriormente los MDE están siendo ampliamente utilizados por la comunidad científica sobre todo desde 1995 (Guisan y Thuiller, 2005; Cayuela *et al.*, 2009; Elith y Leathwick 2009; Franklin, 2009; Peterson *et al.*, 2011; Porfirio *et al.*, 2014). Estos permiten aproximar el rango total de distribución y son herramientas prácticas para identificar las áreas en que es probable que ocurra una especie. Los resultados del análisis de modelación de distribución de especies se pueden usar para diferentes análisis espaciales combinados, y para evaluar el impacto del cambio climático en la distribución de las especies. Estos identifican sitios con ambientes similares a aquellos donde ya se ha encontrado la presencia de una especie como áreas de posible incidencia.

Por ejemplo, los MDE han sido usados en los estudios de relación entre los parámetros ambientales y la riqueza de las especies (García-Morales, 2008; Gaikwad, 2011) potencial invasivo de especies no nativas (Rehfeld *et al.*, 2001; Wakie *et al.*, 2014); distribución de las especies en el pasado (Benito-Garzón, 2006) o en el futuro (Araújo *et al.*, 2004, 2005; Sáenz-Romero *et al.*, 2006; Joyce y Rehfeldt, 2013; González-Irusta *et al.*, 2014; Ramírez-Ojeda *et al.*, 2014; Ruiz-Corral *et al.*, 2014), en la diferenciación ecológica y geográfica de la distribución de especies relacionadas (Graham, 2004).

MaxEnt se ha aplicado exitosamente para priorizar sitios para la conservación *in situ* de especies silvestres o amenazadas y planificar expediciones de colecta de recursos fitogenéticos (Kumar y Stolgren, 2009; Scheldeman y Zonneveld, 2011). Los biólogos los han utilizado para la creación de modelos de distribución de aves (Moreno *et al.*, 2011) y en análisis combinados de aves, insectos, mamíferos y mariposas o aves y mariposas (Camero-Rubio y Lobo, 2010; Sáenz-Romero *et al.*, 2012a; Azor-Hernández y Barro-Cañamero, 2014; Cobos-Cobos, 2016); patrones de movimientos de algunas especies de monos (Howard *et al.*, 2012); evaluar procesos colonizadores de especies invasoras (Lim *et al.*, 2011); evaluar los efectos de cambio climático en la distribución y esparcimiento de enfermedades infecciosas (Peterson y Shaw, 2003; González-Irusta *et al.*, 2014) y para generar información para la planificación de la conservación de la biodiversidad (Ramírez-Herrera *et al.*, 2005; Ledig *et al.*, 2010; Contreras-Medina *et al.*, 2010; Mendoza-Maya *et al.*, 2015).

Actualmente algunos trabajos realizados bajo el enfoque del modelado de nicho ecológico con especies forestales han tenido como objetivo fundamental hacer evaluaciones de la distribución espacial y potencial de algunas especies con fines de conservación y estimar el

impacto del cambio climático ante diferentes escenarios climáticos futuros estimados por el IPCC.

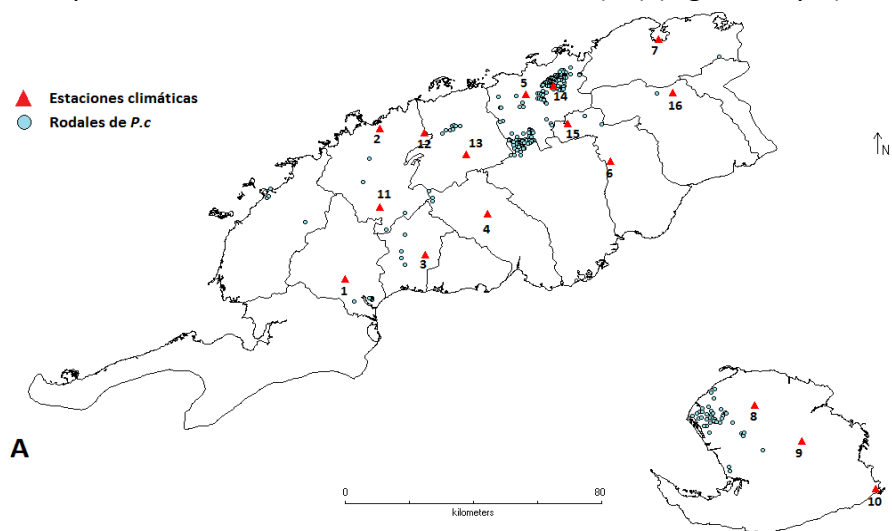
Para México se han realizado estudios de distribución de algunas especies de pinos con ayuda del sistema de modelación MaxEnt, donde se estima que estas especies serán ampliamente afectadas por el cambio climático. Entre las más estudiadas están *Pinus patula*, especies de *Picea* de México y Estados Unidos, *Pinus pseudostrobus*, *Pinus martinezzi*, *Pinus herrerae* (Sáenz-Romero *et al.*, 2011; 2012b; Leal-Nares *et al.*, 2012; Ávila-Coria *et al.*, 2014; Mendoza-Maya *et al.*, 2015) a las que se hizo necesario llevar a cabo estrategias de conservación, restauración ecológica y propuestas de asistir la migración de algunas hacia lugares con mayor potencial de supervivencia en el futuro. Para bosques en Estados Unidos y Siberia en Rusia se evaluó el nicho climático actual, el impacto del cambio climático estimado y las posibles variaciones genéticas en *Pinus strobus* y *Pinus sibirica*, respectivamente (Tchebacoba *et al.*, 2012; Joyce y Rehfeldt, 2013).

En Cuba algunos estudios relacionados con MaxEnt y la distribución actual de especies han sido muy recientes, enfocados a especies animales como anfibios (Fong-Grillo, 2009; Cobos-Cobos 2016), en insectos como las mariposas (Azor-Hernández y Barro-Cañamero, 2014) y en el sector forestal para los pinares naturales en la región occidental de Cuba (Geda-López y Miranda-Sierra, 2016; Miranda-Sierra *et al.*, 2016; 2017).

## CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Georreferencia de pinares naturales en el occidente de Cuba

Los datos de la distribución geográfica de los pinares naturales en el occidente de Cuba, se han tomado de las bases de datos SIFOMAP versión 1.5.2 (Sistema Informativo Automatizado para la Gestión Forestal) con cierre en el 2010, correspondiente a las Empresas Agroforestales Minas de Matahambre, Macurije, Pinar del Río, La Palma, Costa Sur, Bahía Honda e Isla de la Juventud; y datos de las áreas protegidas pertenecientes a la Empresa Nacional para la Protección de la Flora y la Fauna: Área Protegida de Recursos Manejados “Mil Cumbres”, Reserva Ecológica “Los Pretiles”, Reserva Florística Manejada “Sabanalamar-San Ubaldo” y el Área Protegida de Recursos Manejados “La Cañada” en la Isla de Juventud. Todos estos, fueron comprobados. En total se georreferenciaron 1 851 rodales naturales, de ellos 1 606 pertenecen a *Pinus tropicalis* (P.t) y 245 a *Pinus caribaea* var. *caribaea* (P.c), en su conjunto ocupan un área total de 41 620,3 hectáreas (ha) (Figura 1A y B).





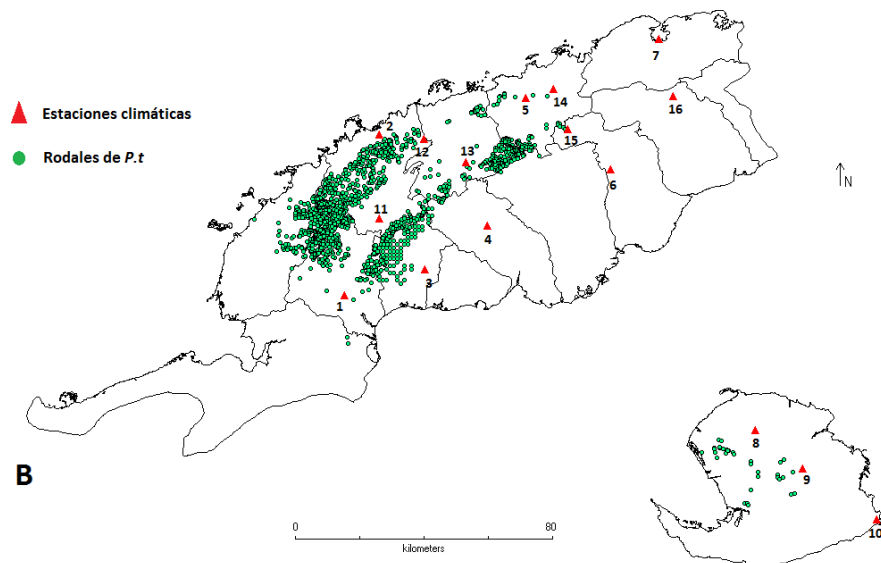


Figura 1. Distribución espacial de los rodales de pinares naturales de *Pinus caribaea* var. *caribaea* (A) y *Pinus tropicalis* (B).

Estaciones meteorológicas e hidroclimáticas de referencia: (1) Isabel Rubio, (2) Santa Lucía, (3) San Juan y Martínez, (4) Pinar del Río, (5) La Palma, (6) Paso Real de San Diego, (7) Bahía Honda, (8) La Fé, (9) Cuba-Francia, (10) Punta del Este, (11) Los Portales, (12) Bejuqueras, (13) Estación Experimental Agroforestal de Viñales, (14) Meseta de Cajálbana, (15) Amistad, (16) Ciro Redondo.

Fuente: SIFOMAP 2010 y Empresa Nacional para la Protección de la Flora y la Fauna.

## 2.2 Definición de la línea base

Los datos del clima fueron tomados a partir de las series históricas de 10 estaciones meteorológicas, pertenecientes al Sistema Meteorológico Nacional: en Pinar del Río (Santa Lucía, Isabel Rubio, San Juan y Martínez, Pinar del Río, La Palma y Paso Real de San Diego), en Artemisa (Bahía Honda) y en Isla de la Juventud (La Fé, Cuba-Francia y Punta del Este). Además, se emplearon las series de 10 a 30 años de cinco Estaciones hidroclimáticas (Amistad, Meseta de Cajálbana, Estación Experimental Agroforestal de Viñales, Bejuqueras, Los Portales y Ciro Redondo), todas estas ubicadas en las montañas. Para los análisis de precipitación se adicionaron los datos de 64 pluviómetros pertenecientes a la red

pluviométrica del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.

La construcción de la línea base, que representa la distribución actual potencial de hábitats para ambas especies, se obtuvo mediante la modelación con dos algoritmos. El primero con el algoritmo BIOCLIM (*Bioclimatic Analysis and Prediction System*) incorporado al DIVA-GIS, utilizando la base de datos del portal de *Earth System Grid* (ESG) de WorldClim ([www.worldclim.org](http://www.worldclim.org)) para el clima observado (1960-1990) bajo el Modelo Climático Global CCM<sub>3</sub>. Partiendo de los resultados de la modelación de los nichos de distribución potencial actual, el BIOCLIM define los hábitats como apropiados y no apropiados.

El segundo con el algoritmo MaxEnt (Máxima Entropía) ver. 3.3.3 (Phillips *et al.*, 2004, Phillips y Dudik, 2010; Elith *et al.*, 2011), utilizando los datos del modelo CCM<sub>3</sub> y los datos climáticos de la serie observada 1981-2010 para los puntos georreferenciados con 17 capas raster correspondientes a las variables climáticas interpoladas. Las variables climáticas fueron: (bio1) temperatura media anual, (bio2) rango medio diurno de temperatura, (bio3) isothermalidad, (bio5) temperatura máxima en el período cálido, (bio6) temperatura mínima del período frío, (bio7) rango anual de temperatura, (bio8) temperatura media del trimestre más lluvioso, (bio9) temperatura media del trimestre más seco, (bio10) temperatura media del trimestre más cálido, (bio11) temperatura media del trimestre más frío, (bio12) precipitación anual, (bio13) precipitación en el período lluvioso, (bio14) precipitación del período seco, (bio16) precipitación en el trimestre más lluvioso, (bio17) precipitación del trimestre más seco, (bio18) precipitación del trimestre más cálido y (bio19) precipitación del trimestre más frío.

El resultado de la modelación con MaxEnt, revela la probabilidad relativa de distribución de

una especie en todas las cuadrículas o celdas en el espacio geográfico definido, en el cual un valor de alta probabilidad asociado a una cuadrícula particular indica la probabilidad de la misma, de tener condiciones ambientales favorables para la especie modelada (Elith *et al.*, 2006).

En la configuración se especificó un máximo de 500 interacciones con un límite de convergencia prefijado en 0,00001 que según Phillips y Dudik, (2010) garantiza la convergencia del algoritmo, es decir que mantiene una estabilidad en sus análisis (Elith *et al.*, 2011). La definición de estos parámetros del límite de convergencia son usualmente los empleados (Kumar y Stohlgren, 2009; Ávila *et al.*, 2014). Con el fin de evitar datos de presencia con registros duplicados se activó borrar duplicados, lo que permitió reducir los sesgos del muestreo.

Para validar y entrenar al mismo tiempo sin que se produzca sobreajuste en la red neural se utilizó la opción *crossvalidate*. Se estableció como formato de salida la función logística, por ser la más sencilla de conceptualizar, ya que proporciona un estimado entre cero y uno de probabilidad de presencia (Phillips y Dudik, 2010). Esta representa la probabilidad estimada de presencia de la especie, dadas las restricciones impuestas por las variables predictivas. Con este formato, las cuadrículas con valores bajos se consideran inapropiadas o muy poco adecuadas para la especie dado su nicho ecológico (Phillips *et al.*, 2004; 2006; Phillips y Dudik, 2010; Elith *et al.*, 2011).

Para evaluar la contribución de las variables bioclimáticas dentro del modelo se utilizó el método de remuestreo *jackknife*. Esta prueba analiza la contribución de cada variable de manera aislada y adicionalmente genera otro con todas las variables, en donde indica la

ganancia de cada una de estas. Para realizar el análisis de la influencia de cada variable climática en la presencia de la especie fueron generadas las curvas de respuesta, ya que estas expresan cómo afectan cada una de estas la predicción de MaxEnt.

La robustez de predicción del modelo se determinó a través de la técnica de evaluación de la curva operacional (ROC) a través del área bajo la curva (AUC) generando un análisis de sensibilidad vs. especificidad, utilizando un 75% de las accesiones de entrenamiento y un 25% de prueba en la opción *random test percentage*, la cual le indica al programa que debe escoger de manera aleatoria y apartar el 25% de los registros de muestras para usarlos en la prueba para la comprobación de los modelos resultantes.

El AUC se puede entonces interpretar como la mayor probabilidad de que un punto de presencia seleccionado aleatoriamente esté ubicado en una celda del raster con un alto valor de probabilidad para la presencia de la especie en comparación al de un punto generado aleatoriamente (Phillips *et al.*, 2006; Elith *et al.*, 2011; Ávila-Coria *et al.*, 2014). La mayor capacidad de predecir de un modelo generado por MaxEnt se alcanza cuando el AUC tiene un valor de 1 (García-Morales, 2008).

Los mapas resultantes fueron analizados y procesados con el Sistema de Información Geográfica para Análisis de la Distribución de Especies DIVA-GIS ver 7.3.0 (Hijmans *et al.*, 2004).

Las predicciones de probabilidades de presencia obtenidas por MaxEnt fueron reclasificadas. A partir del resultado logístico obtenido por MaxEnt (0-1) y tomando como punto de referencia el valor del décimo percentil de presencia de datos de entrenamiento hasta 0,5, se clasificó como aptitud ambiental baja, entre 0,5 - 0,75 media y mayor a 0,75 alta (Ramírez-

Ojeda *et al.*, 2014). Adicionalmente, con el objetivo de estimar el potencial de áreas posibles a utilizar, se calcularon las diferencias entre el área ocupada y las predichas (hábitat potencial).

### **2.3 Modelación de hábitats potenciales bajo diferentes escenarios de cambio climático**

Este análisis se realizó mediante la modelación por dos vías. La primera empleó el modelo HadGEM-ES que forma parte de la modelación del clima desarrollado por el proyecto de intercomparación de modelos acoplados fase 5 (CMIP5) obtenidos del WorldClim ([www.worldclim.org](http://www.worldclim.org)). Para este ensamblaje se consideraron tres de las cuatro sendas representativas de concentración de GEI (RCP 4,5; RCP 6,0 y RCP 8,5) que asumen forzamientos radiativos de 4,5; 6,0 y 8,5 W/m<sup>2</sup> ascendentes para este siglo (Moss *et al.*, 2008). Los datos se procesaron mediante imágenes raster con una resolución de 2,5 minutos de arco (5 Km<sup>2</sup>) y se extrajeron las 17 variables climáticas pronosticadas para los períodos 2050 y 2070.

La segunda vía empleó el modelo climático regional PRECIS-CARIBE (*Providing Regional Climates for Impacts Studys*) (Jones *et al.*, 2004; Centella-Artola *et al.*, 2008; INSMET, 2010), desarrollado por el Centro Hadley del Reino Unido, tomando como base el modelo de circulación general acoplado océano-atmósfera ECHAM4 a nivel del mar. Este generó las proyecciones de clima transitorio para un largo período 1961 – 2100, fijando una resolución espacial de 50 x 50 km (Centella-Artola *et al.*, 2008), todas estas proyecciones de cambio de clima previamente desarrolladas por el Instituto de Meteorología. El dominio del modelo llamado Gran Caribe está comprendido entre los 55° y 120° de longitud Oeste y los 0° y 35° de latitud Norte. Para la evaluación del clima futuro se emplearon las series de escenarios de

emisiones SRES A2 y SRES B2, que son dos de los cuatro escenarios posibles establecidos por el IPCC (IPCC, 2001) los cuales Cuba reporta en sus Comunicaciones Nacionales sobre Cambio Climático.

En estos análisis se utilizaron los datos obtenidos de 17 puntos de la rejilla pertenecientes a la región occidental de Cuba, entre 82°y 85° de longitud Oeste y 21°y 23° de latitud Norte (Anexo 1). Se generaron los 17 mapas rasters correspondiente a las estimaciones de las variables climáticas a corto plazo (2030), mediano (2050 y 2070) y a largo plazo (2099) empleando ArcMap ver. 9.3.

#### **2.4 Evaluación del posible impacto del cambio climático en la distribución potencial de las especies**

La modelación de la distribución de especies se ha usado ampliamente para generar una evaluación rápida del impacto potencial del cambio climático en la distribución de las especies en los ecosistemas que habitan las poblaciones con mayor riesgo e identificar donde se necesitan medidas urgentes de adaptación, manejo y conservación de recursos genéticos (Aitken *et al.*, 2008; Rehfeldt *et al.*, 2015; Sáenz-Romero, 2014).

Este análisis compara las distintas proyecciones de clima futuro con relación a la línea base (Araújo *et al.*, 2005; Benito-Garzón, 2006; Gómez-Díaz *et al.*, 2007; Arribas *et al.*, 2012; Fernández *et al.*, 2012; Tchebakova y Parfenova, 2012; Joyce y Rehfeldt, 2013; Ruiz-Corral *et al.*, 2014; Sáenz-Romero, 2014; Ramírez-Ojeda *et al.*, 2014; Rehfeldt *et al.*, 2015). En este caso, determina las diferencias entre las proyecciones futuras (con los RCP como con los SRES) con relación a la línea base (hábitats potenciales) (Geda-López y Miranda-Sierra, 2016; Miranda-Sierra *et al.*, 2016; 2017). El procesamiento se realizó con el DIVA-GIS a partir

de la substracción de los valores raster binarios de las áreas proyectadas y las comprendidas por la línea base, estableciendo cuatro posibles situaciones:

1. **Áreas de alto impacto:** áreas en las que la especie probablemente exista en las condiciones climáticas actuales pero que dejarán de ser adecuadas en el futuro.
2. **Áreas de bajo impacto:** áreas en las que la especie probablemente exista tanto en las condiciones climáticas actuales como en las condiciones climáticas futuras.
3. **Áreas por fuera del nicho realizado:** áreas que no son adecuadas ni con las condiciones actuales ni con las condiciones futuras (de acuerdo con la modelación).
4. **Nuevas áreas potenciales:** áreas en las que una especie tendría probabilidades de ocurrir en el futuro, pero que no son idóneas para la ocurrencia natural en las condiciones actuales.

Por otra parte, se georreferenciaron las fuentes semilleras de ambas especies para valorar su situación dentro de las proyecciones bajo cualquier categoría de impacto, definiendo las medidas de adaptación en cada especie.

## CAPÍTULO 3. DISTRIBUCIÓN POTENCIAL ACTUAL DE PINARES EN EL OCCIDENTE DE CUBA

### 3.1 Distribución de hábitats potenciales en la actualidad (línea base)

#### 3.1.1 Predicción de las aptitudes ambientales y áreas nuevas sobre la base del clima observado para *Pinus caribaea*

La Figura 2 muestra los resultados generados a partir del BIOCLIM, en ella el área climática clasificada como apropiada para la especie, coincide parcialmente con las zonas de presencia actual. Esta incluye desde la Meseta de Cajálbana extendido al Oeste por la Cordillera de Guaniguanico hasta los municipios Guane y Sandino (Pinar del Río), donde es menos frecuente la presencia de rodales naturales de esta especie, y hacia el centro y Oeste de la Isla de la Juventud.

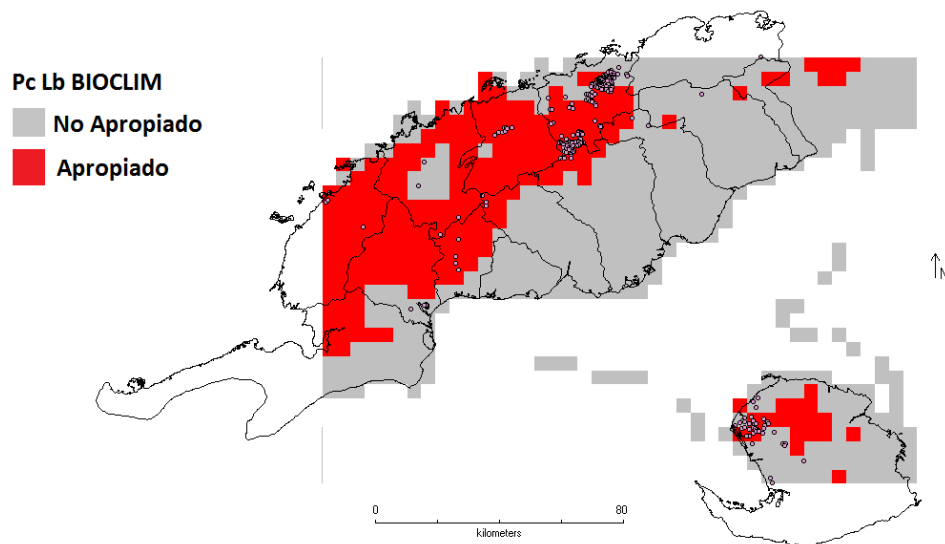


Figura 2. Distribución actual (puntos) y potencial de hábitats de *Pinus caribaea* en el occidente de Cuba con algoritmo BIOCLIM, base de datos del clima mundial 1960–1990



Adicionalmente, la figura muestra la existencia de áreas apropiadas fuera del rango de las áreas de presencia actual y de sus registros de distribución históricos. Este resultado pudiera tener cierta congruencia con la idea propuesta por Samek y Del Risco-Rodríguez en 1989, de que los pinares debieron haber ocupado áreas más extensas que en la actualidad, o que al menos en las condiciones actuales hay potencialidades apropiadas para ocupar territorios mucho mayores a los que ocupan hoy. Esto evidentemente, no toma en consideración que pudiera haber otros factores, además de los climáticos, que determinen la presencia del pinar, como por ejemplo el suelo y la ocurrencia de fuego (López-Almirall, 1982; Del Risco-Rodríguez y Reyes-Domínguez, inédito).

Por otra parte, cuando fue utilizado el algoritmo MaxEnt con los datos del Modelo Climático Global CCM<sub>3</sub>, el modelo resultante de probabilidad de presencia de la especie (Figura 3A) con condiciones climáticas potenciales en Cuba señala que, las mayores probabilidades se ubican hacia la costa norte y la zona montañosa central de Pinar del Río, y en la Isla de la Juventud se extiende al centro y Norte, lugares donde en la actualidad se registra la presencia de la especie. Las probabilidades más bajas se aprecian en Artemisa y la costa norte desde La Habana hasta Villa Clara en la región central del país. Todo ello indica que no existen condiciones de clima idóneo para la especie en la región central de Cuba.

El mapa recodificado a aptitud ambiental (Figura 3B), refleja que existen condiciones de aptitud media solamente en la costa norte del municipio Minas de Matahambre desde Malas Aguas hacia el Oeste hasta Río del Medio, mientras que aptitud baja ocupan las Alturas de Pizarras del Norte y del Sur, y la Cordillera de Guaniguanico en Pinar del Río. Mientras que

para la Isla de la Juventud abarca todo el centro y Norte del territorio, quedando el resto del territorio fuera de su nicho climático.

El uso de los datos a partir de modelos climáticos globales, tiene como desventaja la poca variación espacial que le atribuyen a las variables climáticas en las islas, así como la existencia en estas de una insuficiente cantidad de estaciones climáticas (Centella-Artola *et al.*, 2008; ECLAC, 2010; Campbell *et al.*, 2010; Karmalkar *et al.*, 2013).

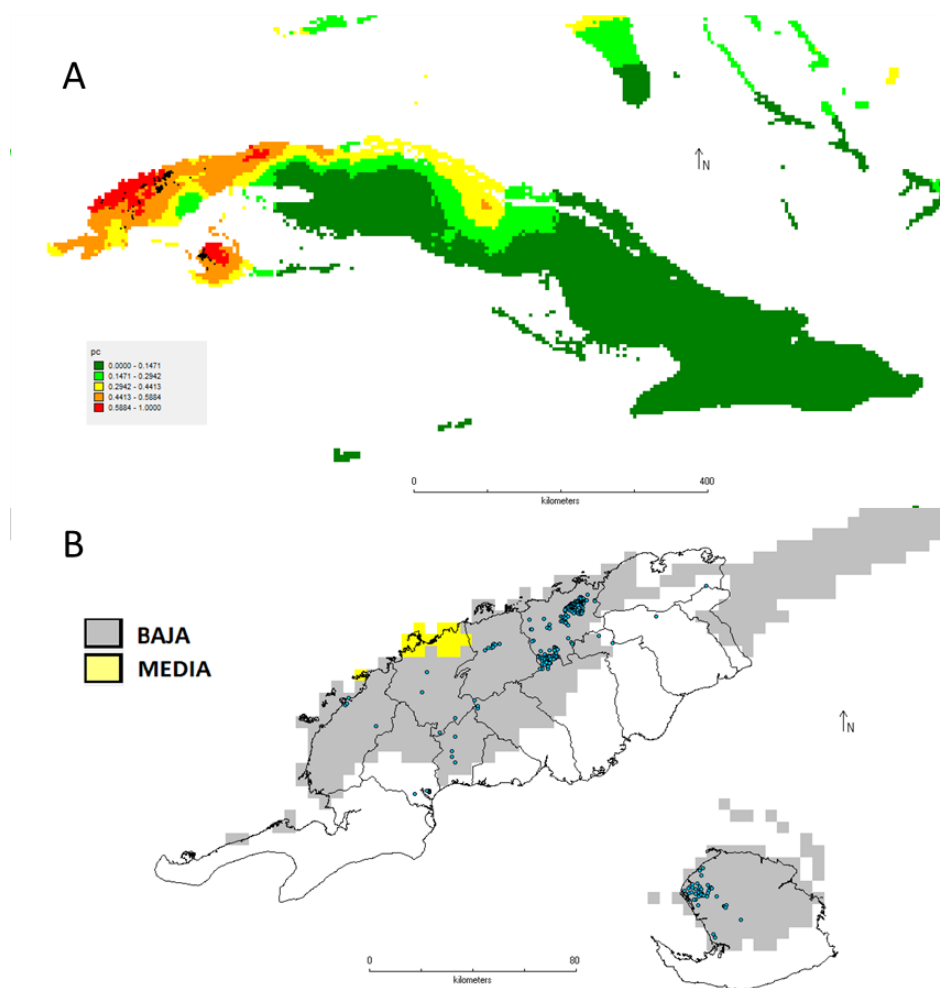


Figura 3. Representación del modelo MaxEnt de la probabilidad de distribución potencial de *Pinus caribaea* en Cuba (A). Clasificación a aptitud ambiental del modelo de distribución potencial (B). Modelo climático Global CCM<sub>3</sub>, base de datos del clima mundial 1960-1990

En este caso, los resultados obtenidos con los algoritmos BIOCLIM o MaxEnt, basados en modelos climáticos globales (CCM<sub>3</sub>), no predicen coherentemente la relación presencia y hábitat potencial de la especie. Esta problemática es también expuesta por varios autores (Cobos-Cobos, 2016; Silva *et al.*, 2015) que plantean que a pesar de que los modelos climáticos globales fueron el punto de partida para la simulación de escenarios climáticos futuros, para las pequeñas regiones e islas muestran resultados muy burdos, con pocos detalles, por la baja resolución o amplitud de la rejilla (100 km o más), por lo que es necesario una mayor refinación en los resultados que representen con más detalle los procesos climáticos que ocurren en la región, y la solución está en el uso de modelos climáticos regionales (Elith *et al.*, 2006; ECLAC, 2010; Rehfedt *et al.*, 2015).

Asimismo, cuando se modeló con el algoritmo MaxEnt con la serie observada (1981 -2010) en el occidente de Cuba, se obtuvo un modelo con mayor resolución. Los análisis de precisión de este (Figura 4) muestran que el AUC tanto para los datos de entrenamiento (0,958) como para datos de prueba (0,933) estuvieron por encima del 93%, por tanto el modelo predice con un nivel de especificidad y confianza alto. De acuerdo con Phillips *et al.*, (2004) y Elith *et al.*, (2006; 2011), cuando el área bajo la curva es superior a 0,9 existe un buen ajuste para predecir la presencia de la especie.

Este resultado fue similar a estudios de predicción de hábitat potencial en coníferas (Contreras-Medina *et al.*, 2010; García-Aranda *et al.*, 2012; Ávila-Coria *et al.*, 2014) y otras especies de interés forestal (Kumar y Stohlgren, 2009; Smith *et al.*, 2012). Sin embargo, en especies de animales se reportan valores inferiores de AUC en la modelación con variables climáticas, al parecer por la influencia de otras variables ambientales en la definición de su

nicho climático (Fong-Grillo, 2009; Azor-Hernández y Barro-Cañamero, 2014; Cobos-Cobos, 2016).

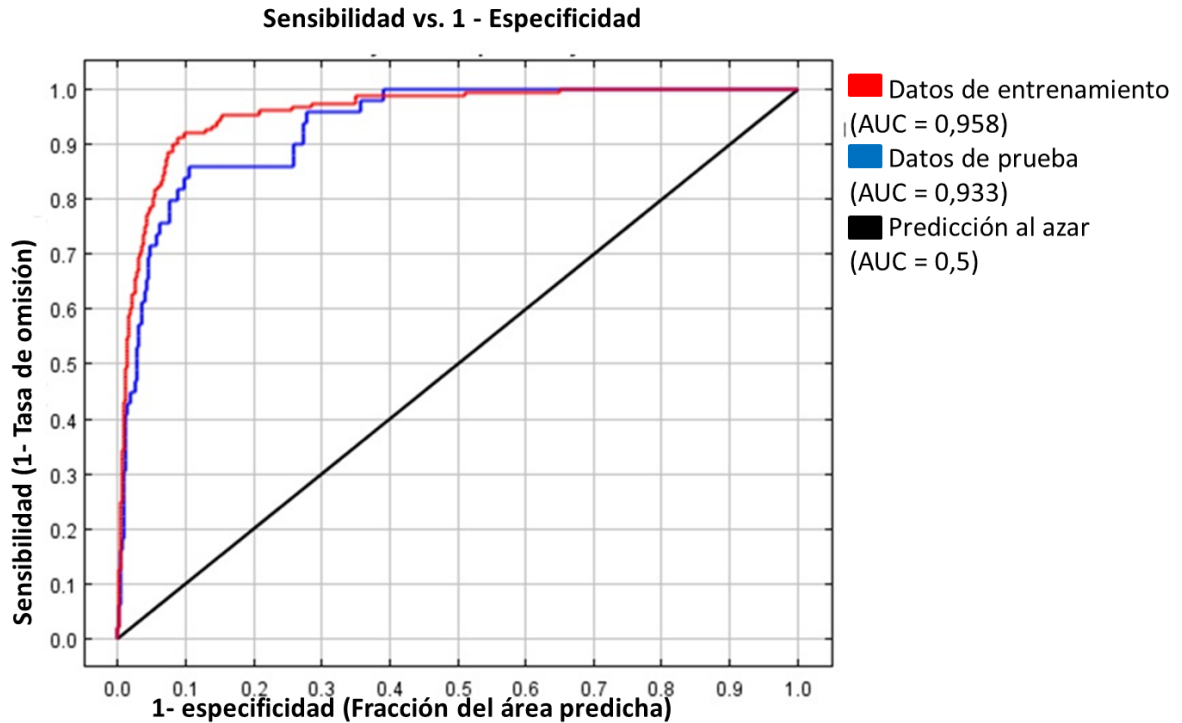


Figura 4. Curva operacional (ROC) del modelo para *Pinus caribaea*, serie clima observada 1981-2010

En la Figura 5A se muestra las probabilidades de presencia de la especie. Los mayores valores reconocidos como altamente probables se distribuyen en la Meseta de Cajálbana, Marbajita y se extiende al suroeste pasando por Caiguanabo, Las Calderas, El Lirio hasta Murguía al suroeste, entre los municipios La Palma y Consolación del Sur en Pinar del Río, y sobre La Demajagua al noroeste de la Isla de La Juventud. Esto es coincidente con las áreas donde existe actualmente una mayor densidad de rodales naturales de esta especie. Es probable que la especie no ocupe todas las áreas de distribución potencial representadas en el mapa

de predicción, porque su dispersión esté limitada por la presencia de barreras geofísicas (edáficas), climáticas, por el desarrollo de otra formación vegetal o por la acción antrópica.

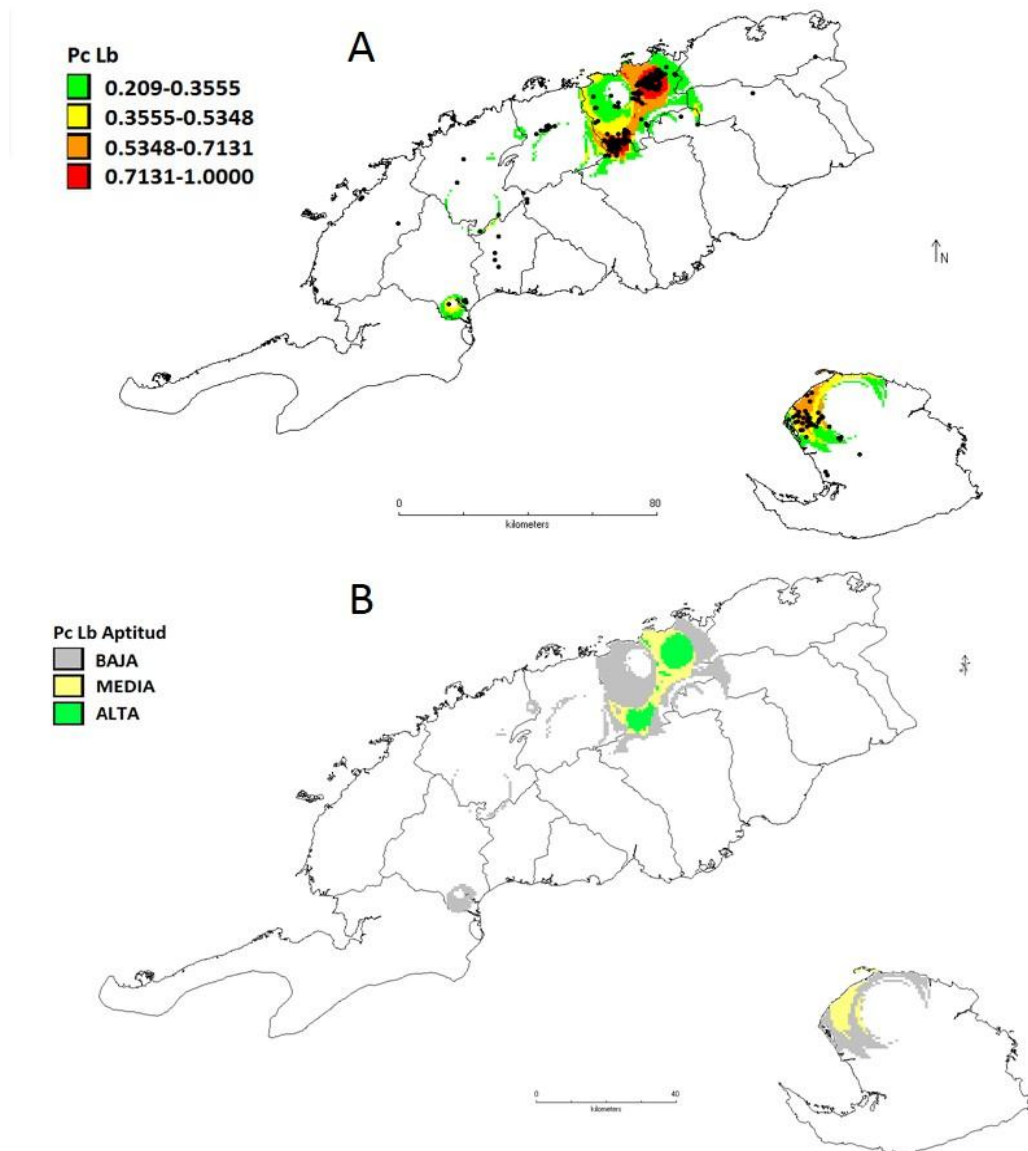


Figura 5. A-Distribución de las probabilidades de hábitats potenciales actuales de *Pinus caribaea*; B-Mapa de aptitud ambiental del modelo con serie 1981-2010

*Nota: Puntos en negros localización de rodales actuales*

El modelo predictivo recodificado en aptitudes ambientales, muestra existencia de lugares con condiciones climáticas favorables para el desarrollo de la especie, aunque no hayan

datos de presencia; y otros rodales que están fuera de su nicho climático (Figura 5B). Las áreas de aptitud ambiental alta coinciden con las de mayor probabilidad de presencia potencial, observándose un mayor porcentaje de áreas con aptitud baja y media al Este y Oeste de la ubicación actual. En la Isla de la Juventud hay una reducción de las áreas potenciales hacia el noroeste, con predominio de aptitud media. Por otro lado, las áreas con aptitud baja ocupan la mayor parte y se localizan en Pinar del Río en la llanura sur-occidental (San Ubaldo-Sabanalamar en el municipio Guane), y parte del territorio en el municipio La Palma.

Hoy el área ocupada por los pinares naturales de *Pinus caribaea* en el occidente de Cuba es de aproximadamente 8 538,2 ha. La Tabla 1 muestra que el nicho potencial total es de unas 126 701 ha, es decir, 14 veces superior al área ocupada actual. Teniendo en cuenta solo el área de aptitud ambiental alta y media sería 42 900 ha, 5 veces mayor que el área ocupada en la actualidad. Por tanto, si no hay otras limitantes, aún existe suficiente potencial para establecer nuevas áreas de plantaciones para esta especie en el resto del municipio La Palma.

Tabla 1. Estimación del área con aptitud ambiental en hectáreas (ha) de *Pinus caribaea* para el período observado 1981-2010

Serie	Aptitud (ha)			Total
	Baja	Media	Alta	
<b>1981-2010</b>	83 801	35 500	7 400	126 701

El análisis de la importancia de cada variable mediante prueba de *jackknife* (Figura 6), muestra que las variables que más influyen en la presencia de la especie, fueron aquellas

asociadas al régimen anual de las precipitaciones: la precipitación anual (bio12Ranual), la precipitación en el período lluvioso (bio13RpII) y período seco (bio14Rpseco). Por lo tanto, para la especie estos son los requerimientos climáticos de mayor importancia en su distribución espacial, con una contribución que supera el 50%.

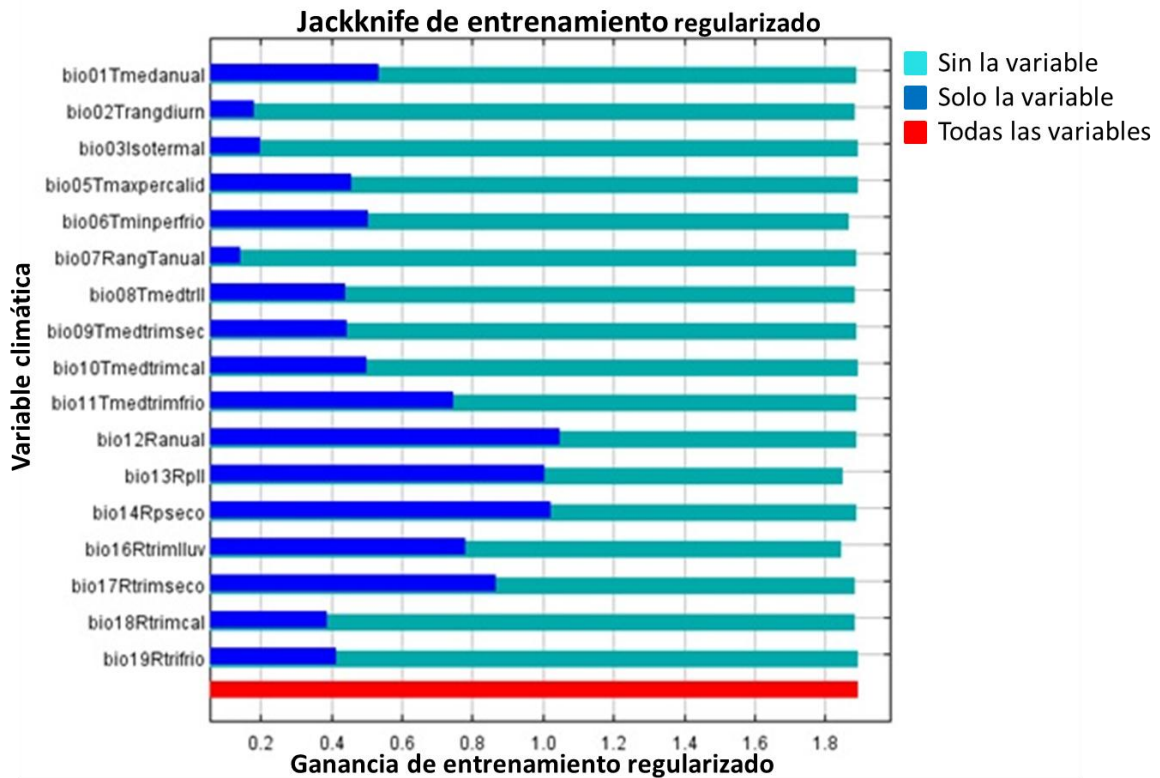


Figura 6. Importancia relativa de cada variable bioclimática al modelo para *Pinus caribaea*, mediante la prueba de *jackknife*

Sorprendentemente, hubo una menor influencia (importancia) del régimen térmico, donde el rango de temperatura anual, la temperatura diaria e isotermalidad no superan el 10% de contribución. En este caso se explica que no es el régimen térmico el que debe afectar en primer orden la distribución potencial de los pinares de esta especie, sino las condiciones de aridez y sequía, su intensidad y frecuencia de ocurrencia (Del Risco-Rodríguez y Reyes-Domínguez, inédito).

La mayor parte de la literatura científica se ha concentrado en elementos taxonómicos o de tipología de bosques donde se encuentra la especie, y por tanto describen la especie y sus condiciones de hábitats (Betancourt, 1987; Francis 1992; Farjon y Styles, 1997). Samek y Del Risco-Rodríguez (1989) y Del Risco-Rodríguez y Reyes-Domínguez (inédito) plantearon que esta especie vive en hábitats donde existe un régimen de precipitación entre 1 700 a 1 800 mm y temperatura media anual entre 22°C y 24,3°C. Sin embargo, estudios refinados acerca de cuáles variables climáticas o elementos limitantes para su presencia y desarrollo, continua siendo una tópic pendiente en la comprensión de la autoecología de la especie.

Estos resultados demuestran que la prueba *jackknife* permite identificar las exigencias climáticas de las especies y sus rangos que determinan la probabilidad de presencia. Por lo tanto, este constituye un primer acercamiento a la evaluación de la influencia de las variables climáticas en la distribución de la especie. Asimismo, esta ha sido una alternativa empleada por varios autores para algunas especies endémicas o en peligro de extinción: *Cedrela odorata* (Gómez-Díaz *et al.*, 2007); *Taxus globosa* (García-Aranda *et al.*, 2012); *Pinus strobus* (Joyce y Rehfeldt, 2013); *Pinus herrerae* (Ávila-Coria *et al.*, 2014), además ver revisión Gray y Hamann, (2012).

Un análisis más detallado, lo representan las curvas de respuestas (Phillips *et al.*, 2004; 2006; Elith y Leathwick, 2009; 2011; Ferrer-Sánchez y Rodríguez-Estrella, 2016) estas constituyen un medio importante para entender cómo las variables climáticas, de manera independiente, afectan las predicciones, es decir la probabilidad de presencia (Phillips, 2005). Mayores valores en el eje Y significan una mayor influencia de la variable sobre el modelo.



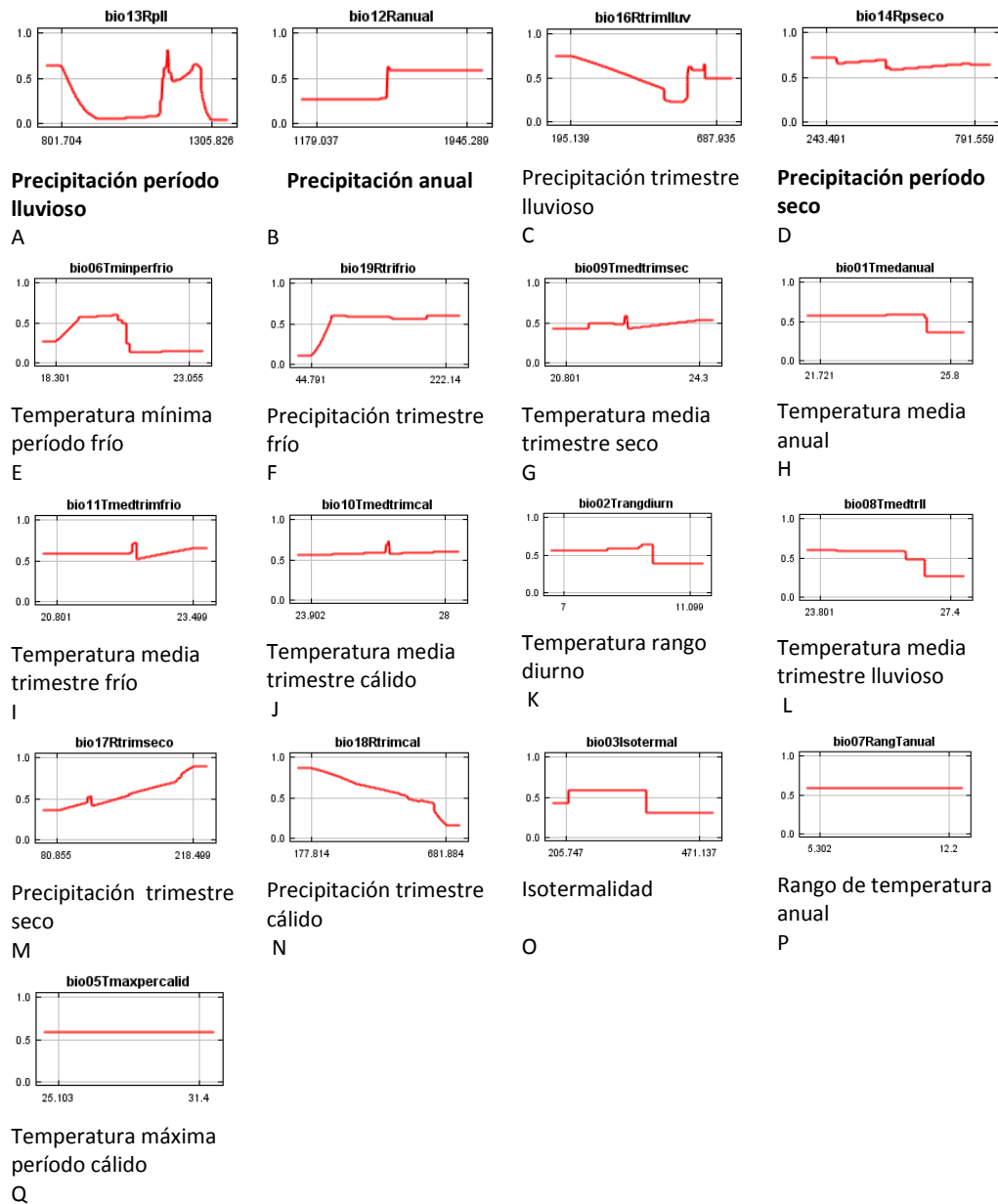


Figura 7. Contribución de cada variable climática al modelo generado con MaxEnt para *Pinus caribaea*. Nota: Eje Y representa la probabilidad de presencia de la especie y el X los valores de la variable

La Figura 7 muestra que las probabilidades de presencia de *Pinus caribaea* aumentan si la pluviometría anual está en rangos de 1 500 - 2 000 mm (Figura 7B), si en el período lluvioso

caen menos de 1 200 mm (Figura 7A) disminuye su probabilidad, mientras que si durante el período seco los rangos están entre 200 - 800 mm son favorables (Figura 7D). Es decir, la especie prefiere un clima de zonas montañosas donde predominan altos niveles de humedad relativa y un régimen anual de precipitaciones bien definido. Por tanto, si se pronostican cambios estacionales en los regímenes de lluvia en el Caribe (Centella-Artola *et al.*, 2001; Gutiérrez-Pérez *et al.*, 2000; ECLAC, 2010), entonces podría afectarse la distribución espacial futura de *Pinus caribaea*.

Para Del Risco-Rodríguez y Reyes-Domínguez (inédito) los acumulados anuales de precipitaciones no representan un factor limitante para el desarrollo de los pinares, en cambio los períodos extensos de sequía si afectan, ya que los pinos no poseen reposo vegetativo, así que una larga y extensa sequía podría comprometer la existencia de estos.

Esto sugiere que si hay cambios bruscos y prolongados en los rangos para una o varias variables climáticas, pudieran además presentarse afectaciones a los procesos fisiológicos, a la producción de resina, la producción de biomasa e inclusive la floración y producción de semilla (Rehfeldt y Wykoff, 2001; Rehfeldt *et al.*, 2002; Sáenz-Romero, 2014). Este aspecto, se encuentra bien estudiado en varias coníferas con amplia distribución (ver Aitken *et al.*, 2008), apoyado además en estudios genéticos de la especie y sus poblaciones son la base para promover la resiliencia. En Cuba dichos estudios son muy incipientes, y hasta el momento se dispone de información de alteraciones de las fenofases vegetativas y reproductivas en tres especies forestales (Hechavarría-Kindelán, *et al.*, 2008; 2009; Hechavarría-Kindelán, 2012; Álvarez-Brito y Mercadet-Portillo, 2014) y la inversión en el patrón anual de los rendimientos mensuales de resina para *Pinus caribaea* (Álvarez-Brito y

Mercadet-Portillo, 2014). Por lo que son cruciales, estudios a corto y mediano plazo, de simulación de cambios en las variables climáticas en condiciones de viveros y monitoreo de la fenología.

### **3.1.2 Predicción de las aptitudes ambientales y áreas nuevas sobre la base del clima observado para *Pinus tropicalis***

La Figura 8 muestra los resultados generados a partir del BIOCLIM para *Pinus tropicalis*. En este caso, el área clasificada con condiciones climáticas apropiadas coincide con las zonas de mayor presencia actual de la especie, localizadas estas en las Alturas de Pizarras del Norte y del Sur, con un ligero corrimiento hacia el Oeste en el municipio Mantua, en Pinar del Río. En el caso de la Isla de la Juventud, se predicen áreas bioclimáticas apropiadas más al centro de las ocurrencias actuales, aproximadamente sobre El Vaquerito y El Rastro incluyendo La Cañada que es un área protegida donde la especie se desarrolla simpátricamente con *Pinus caribaea*. La predicción de nichos apropiados en esta zona posiblemente está influenciada a causa de la baja resolución del modelo climático empleado, el cual asume muy poca variabilidad horizontal de las variables climáticas.

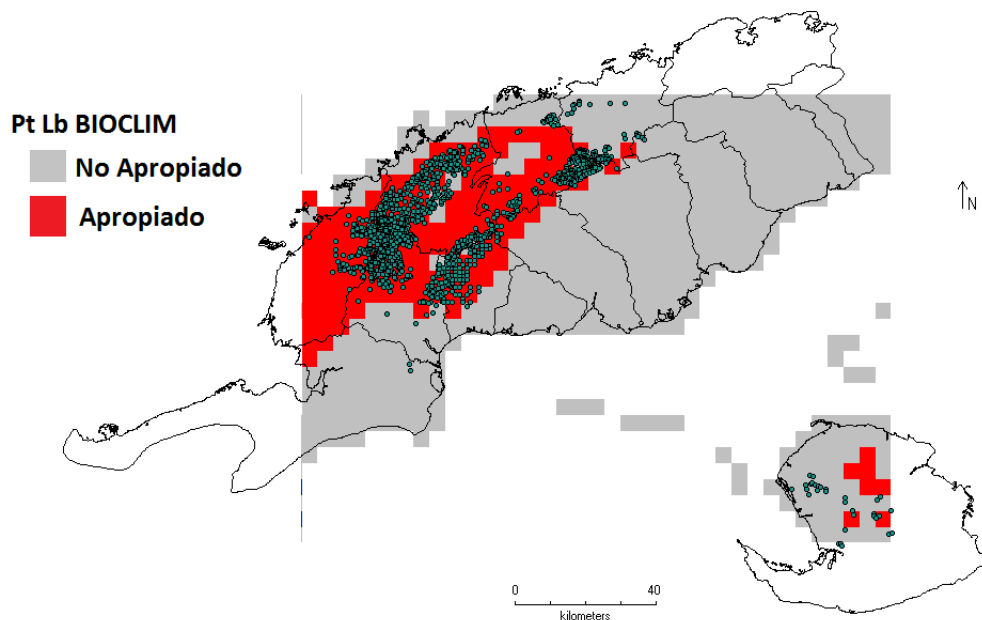


Figura 8. Distribución actual (puntos) y potencial de hábitats de *Pinus tropicalis* en el occidente de Cuba con algoritmo BIOCLIM, base de datos del clima mundial 1960–1990

De igual manera, cuando fue empleado el algoritmo MaxEnt con los datos de clima observado serie (1980-2010) en el modelo climático global CCM<sub>3</sub>, el modelo resultante (Figura 9A) de probabilidad de presencia de la especie con condiciones climáticas en Cuba, muestra que las mayores probabilidades para la especie se extienden hacia el Oeste en la Cordillera de Guaniguanico, las Alturas de Pizarras del Norte y del Sur y parte de la llanura suroccidental sobre Sábalo y San Juan y Martínez, en Pinar del Río. Otras áreas se aprecian sobre el suroeste y centro de Artemisa, extendiéndose al noreste por La Habana y toda la costa Norte hasta Matanzas y Villa Clara, con probabilidades menores a las observadas en Pinar del Río. En la Isla de la Juventud la mayor probabilidad coincide con las áreas ocupadas

en la actualidad, aunque se extienden más al Oeste y Norte del territorio isleño. En el resto del país no se estiman condiciones climáticas potenciales para la especie.

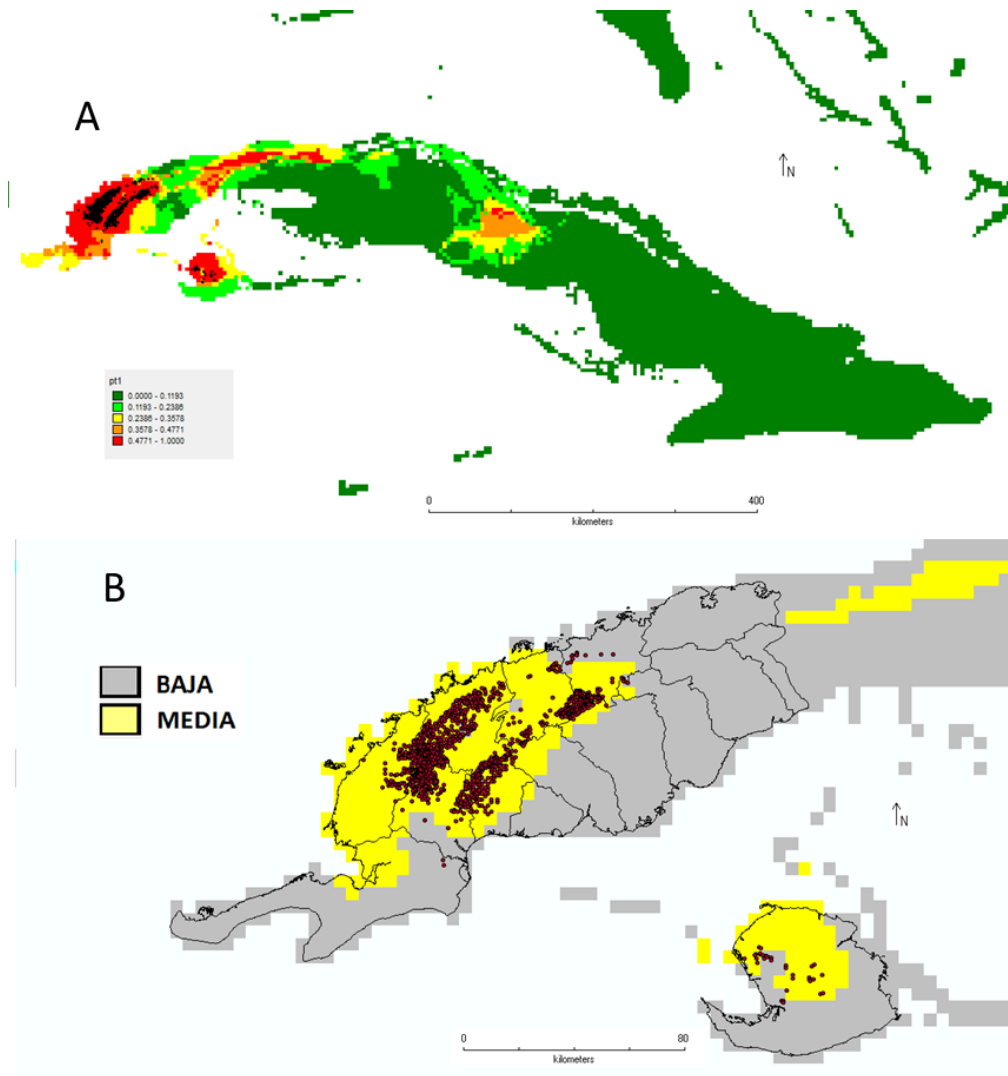


Figura 9. Representación del modelo MaxEnt de la probabilidad de distribución potencial de *Pinus tropicalis* en Cuba (A). Clasificación a aptitud ambiental del modelo de distribución potencial (B). Modelo climático Global CCM<sub>3</sub>, base de datos del clima mundial 1960-1990

La Figura 9B, muestra el mapa reclasificado a aptitud ambiental para el occidente de Cuba, donde la aptitud baja se define a partir del décimo percentil cuyo valor es 0,49. El mapa

muestra que las áreas con aptitud media coinciden con los lugares de presencia actual de la especie en las Alturas de Pizarras del Norte y del Sur y un ligero corrimiento de al Oeste sobre Mantua y norte del municipio Sandino, en Pinar del Río. En la Isla de la Juventud hay coincidencia de aptitud media con las áreas ocupadas en la actualidad. Sorprendentemente, todo el resto del occidente de Cuba clasifica con aptitudes bajas para la especie.

A partir de la modelación con la serie de clima observado (1981-2010) en el occidente de Cuba bajo el algoritmo MaxEnt, se obtuvo un modelo con mejor desempeño predictivo (Figura 10). Las AUC de los datos de entrenamiento (0,925) y los de prueba (0,916) estuvieron por encima del 91%, cifras estas que indican un buen ajuste, es decir una buena capacidad predictiva del modelo para estimar la presencia de *Pinus tropicalis*.

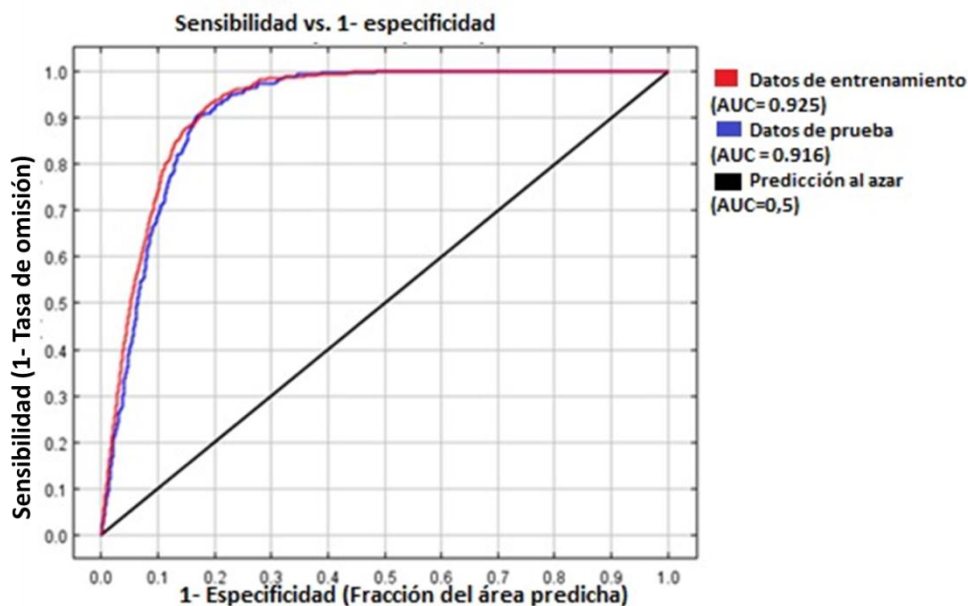


Figura 10. Curva operacional (ROC) del modelo para *Pinus tropicalis*, serie clima observada 1981-2010

En la Figura 11A se muestra las probabilidades de presencia de *Pinus tropicalis* en el occidente de Cuba. Las áreas de alta probabilidad se encuentran en las Alturas de Pizarras del

Norte desde Macurijes y La Manaja en el municipio Mantua hasta Malas Aguas y Sitio Morales en el municipio Viñales.

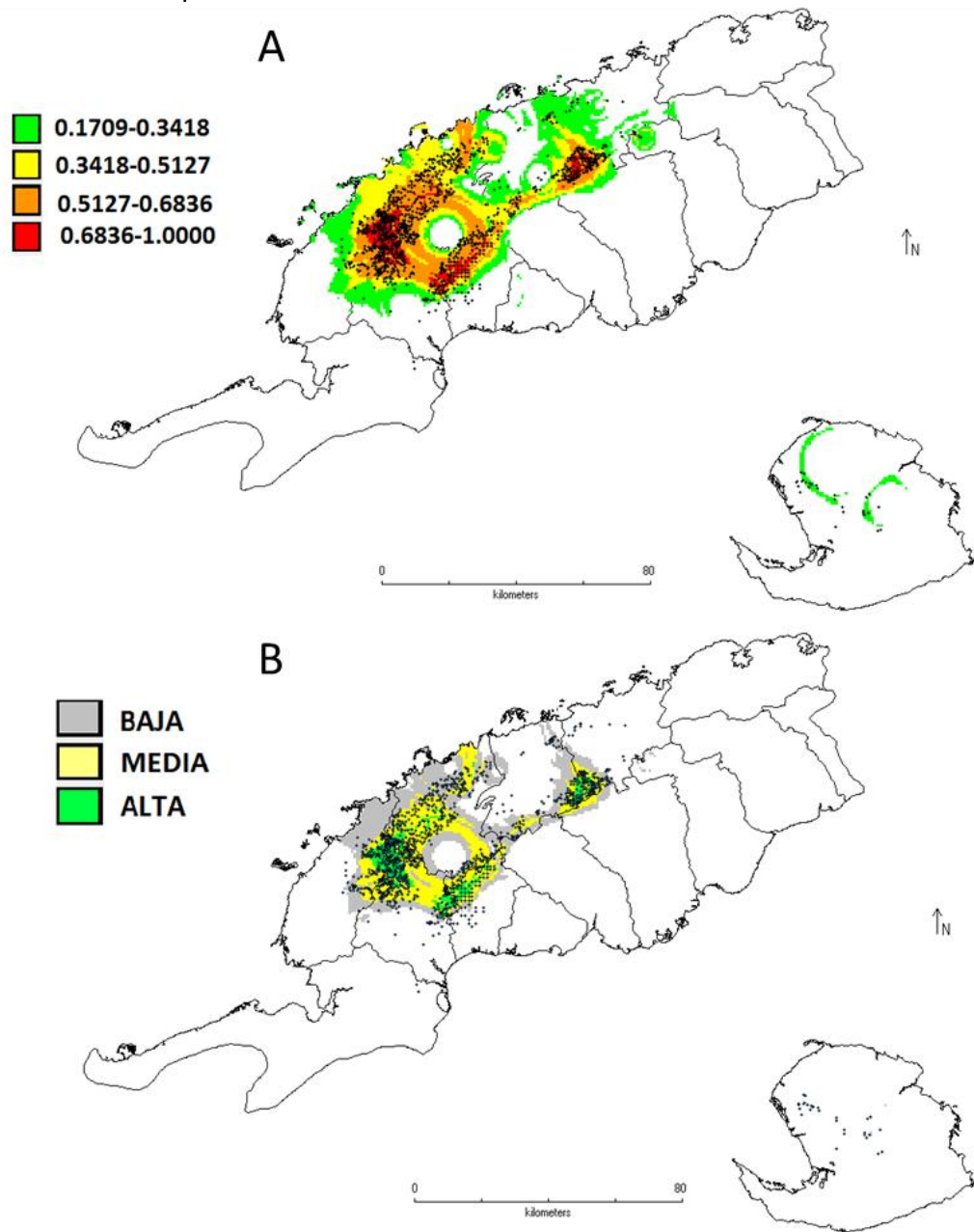


Figura 11. A- Distribución de las probabilidades de hábitats potenciales actuales de *Pinus tropicalis*; B- Mapa de aptitud ambiental del modelo con serie 1981-2010

*Nota: Puntos en negros localización de rodales actuales*

En las Alturas de Pizarras del Sur se extiende desde Los Portales en el municipio Guane al noreste, pasando por Lagunilla en San Juan y Martínez, el Guayabo en el municipio Pinar del Río hasta Murguía, Juan Brans y Sitio Peña al Sur del municipio La Palma, en Pinar del Río. En la Isla de la Juventud se predice muy bajas probabilidades de distribución potencial de la especie.

La Figura 11B muestra el mapa de aptitudes ambientales reclasificado a partir del umbral del décimo percentil de presencia de entrenamiento, igual a una probabilidad de 0,318. Las áreas con aptitud ambiental alta coinciden con los núcleos de mayor presencia actual, ubicados en áreas de La Manaja y Mina Dora en los municipios Mantua y Guane. Por las Alturas de Pizarras del Sur en Punta de la Sierra, San Carlos y Loma del Destino en los municipios Guane y San Juan y Martínez y finalmente sobre Juan Brans hasta Las Calderas en los municipios Viñales y La Palma, en Pinar del Río. Una gran parte de estas áreas, aparecen reportadas como rodales naturales por el SIFOMAP y por las áreas protegidas; y se corresponden con zonas de aptitud ambiental alta y media. En la Isla de la Juventud no hay áreas con aptitudes ambientales, es decir, en la actualidad no hay condiciones de clima favorable para el desarrollo de *Pinus tropicalis* en ese territorio.

Tabla 2. Estimación del área con aptitud ambiental en hectáreas (ha) de *Pinus tropicalis* para el período observado 1981-2010

Serie	Aptitud (ha)			Total
	Baja	Media	Alta	
<b>1981-2010</b>	80 400,7	113 400	16 600,4	210 401,1



Hoy el área ocupada por los pinares de *Pinus tropicalis* es de 33 082 ha. La Tabla 2 muestra que el potencial total es de aproximadamente 210 500 ha, es decir, 6 veces superior al área ocupada real. Es distintivo, el predominio de áreas con aptitud media, las cuales ocupan el 53% del total del nicho climático predicho por el modelo. Por tanto, se considera que en la actualidad existe un gran potencial de áreas con condiciones favorables de aptitud ambiental para *Pinus tropicalis*, muy superiores a las que realmente existen. Esto favorece el establecimiento de nuevas estrategias para la reforestación y conservación de estos pinares naturales, así como para el establecimiento de nuevas plantaciones.

La prueba de *jackknife* (Figura 12) muestra que las variables que más influyen fueron la precipitación anual (bio12Ranual), la precipitación en el período seco (bio14Rpseco) y la temperatura media en el trimestre más cálido (bio10TmedTrimcal), es decir, para la especie no solo el régimen de precipitaciones sino también el régimen de temperatura, constituyen los requerimientos climáticos de mayor importancia en la distribución espacial de la especie, con una contribución que superan el 60%.

Sin embargo, las variables menos importantes fueron las precipitaciones en el período lluvioso y en el trimestre más cálido, así como la temperatura media en el trimestre más frío.

De forma general, para los pinos en el occidente de Cuba continúa siendo una posible limitante climática para su presencia, el régimen anual de precipitaciones. Pero, para *Pinus tropicalis* aparecen las temperaturas en el verano como importantes para su nicho climático.

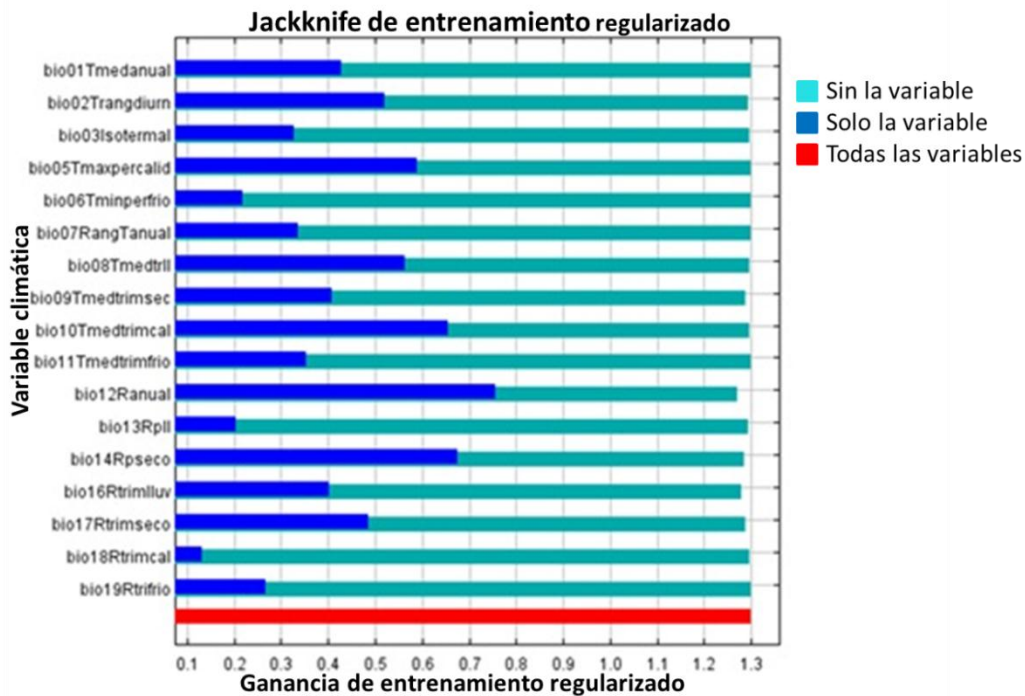


Figura 12. Importancia relativa de cada variable bioclimática al modelo para *Pinus tropicalis*, mediante la prueba de *jackknife*

De acuerdo con la Figura 13, la probabilidad de presencia de *Pinus tropicalis* está relacionada con un régimen anual de precipitaciones mayor a 1 600 mm (Figura 13A), precipitaciones entre 400 – 600 mm en el período seco (Figura 13B) y con una temperatura media del trimestre cálido entre 24°C y 26°C (Figura 13D). A pesar que los estudios de Samek y Del Risco, (1989) y Del Risco-Rodríguez y Samek (1995) evalúan el comportamiento del clima en las zonas de presencia de la especie, no definen los rangos climáticos que determinan la presencia de la especie.

Similar a *Pinus caribaea*, cualquier cambio en el régimen de lluvia, pudiera afectar la distribución de *Pinus tropicalis*, aunque este último tiene menos dependencia de la lluvia en el período seco. Las estimaciones de presencia de la especie *P. tropicalis*, datan del Mioceno basados en datos moleculares (Geadá-López *et al.*, 2002; 2004; Gernandt *et al.*, 2005), por lo que la especie ha experimentado varios eventos de cambio climático durante su evolución; la

capacidad de adaptarse a condiciones extremas con regímenes de fuegos recurrentes, se reconoce como un carácter ancestral, que le ha permitido reajustes anatómicos y morfológicos para su sobrevivencia (He *et al.*, 2012; Keeley, 2012) como el estado de hierba (*grass stage*) durante los primeros 3 a 5 años de edad.

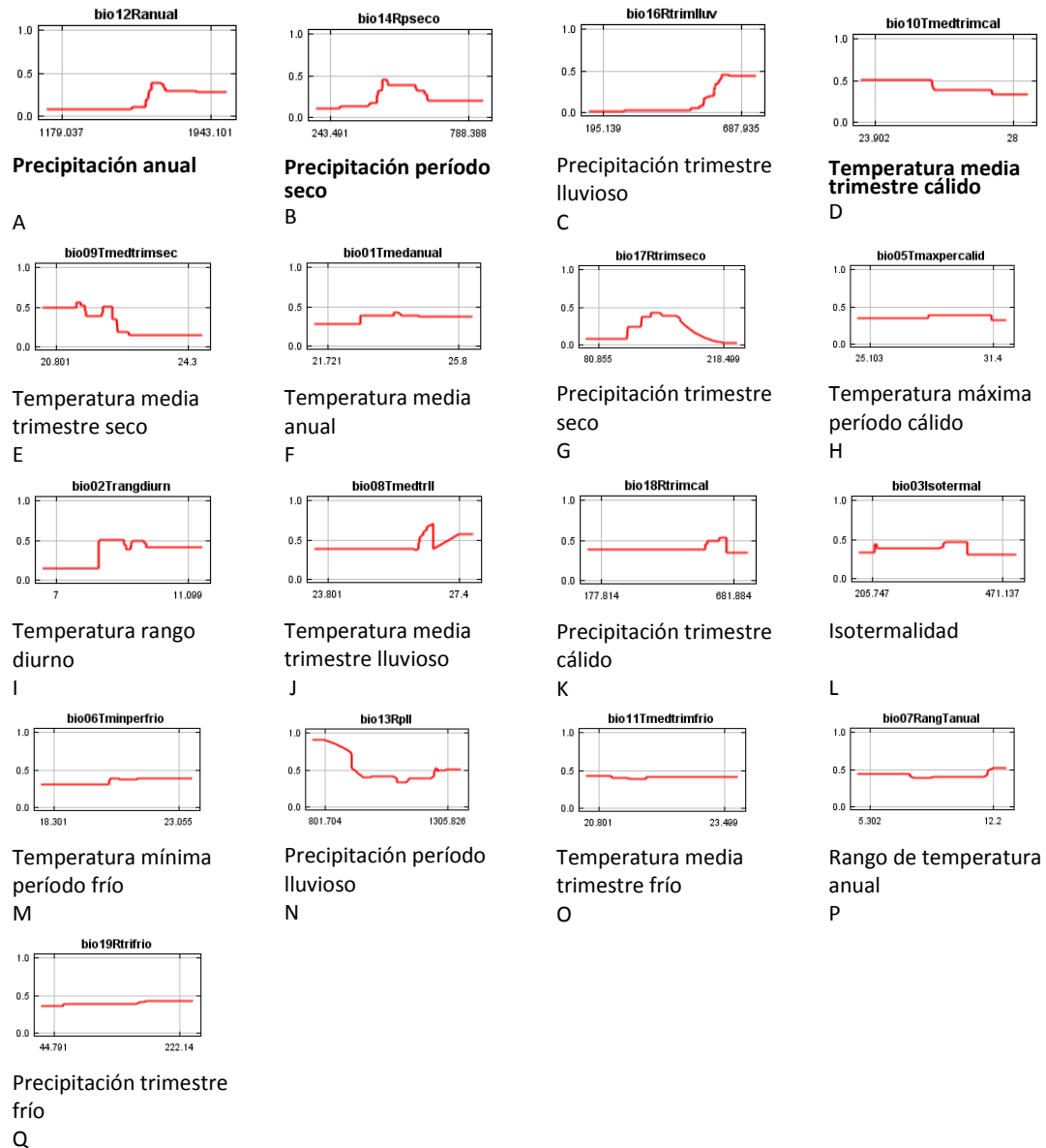


Figura 13. Contribución de cada variable climática al modelo generado con MaxEnt para *Pinus tropicalis*. Nota: Eje Y representa la probabilidad de presencia de la especie y el X los valores de la variable

## **CAPÍTULO 4. MODELACIÓN DE HÁBITAT POTENCIAL DE PINARES EN EL OCCIDENTE DE CUBA EN DIFERENTES ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

### **4.1 Predicción de hábitats potenciales para los pinares de *Pinus caribaea* y *Pinus tropicalis* en diferentes escenarios de cambio climático**

#### **4.1.1 Predicción de hábitats potenciales para diferentes RCP en *Pinus caribaea***

La modelación con MaxEnt sobre la base del modelo climático global HadGEM-ES (CMIP5) y para los diferentes RCP 4,5; 6,0 y 8,5 en los años 2050 y 2070, muestran que la distribución potencial de *Pinus caribaea* (Figura 14, Anexo 1) con condiciones de aptitud ambiental media se concentra en Pinar del Río hacia la Cordillera de Guaniguanico (incluye las Alturas de Pizarras del Norte y del Sur) y costa norte; en Artemisa ocupa la Sierra del Rosario hasta la parte más occidental de las Alturas de Bejucal-Madruga Coliseo, al Sur en Güira de Melena y Alquizar y el centro norte de la Isla de la Juventud.

Las mayores probabilidades de presencia (Anexo 1) con valores de 0,5 a 0,8 se distribuyen por toda la Cordillera de Guaniguanico, incluyendo las Alturas de Pizarras del Norte y del Sur hacia el noreste hasta Cajálbana, en Pinar del Río y más al Este las Alturas en Soroa en la Sierra de los Órganos, Artemisa y la mitad Norte de la Isla de la Juventud; sobre el centro de este territorio se aprecian estrechas franjas de Este a Oeste con bajas probabilidades de ocurrencia (Anexo 1). Para el resto del territorio nacional no se prevén lugares con aptitudes altas, ni bajas (Figura 14). De ahí que este análisis demostró que para el resto del país no

existen condiciones climáticas favorables para *P. caribaea*. Todo ello conduce a reconsiderar plantaciones de la especie fuera de las áreas con hábitat potenciales.

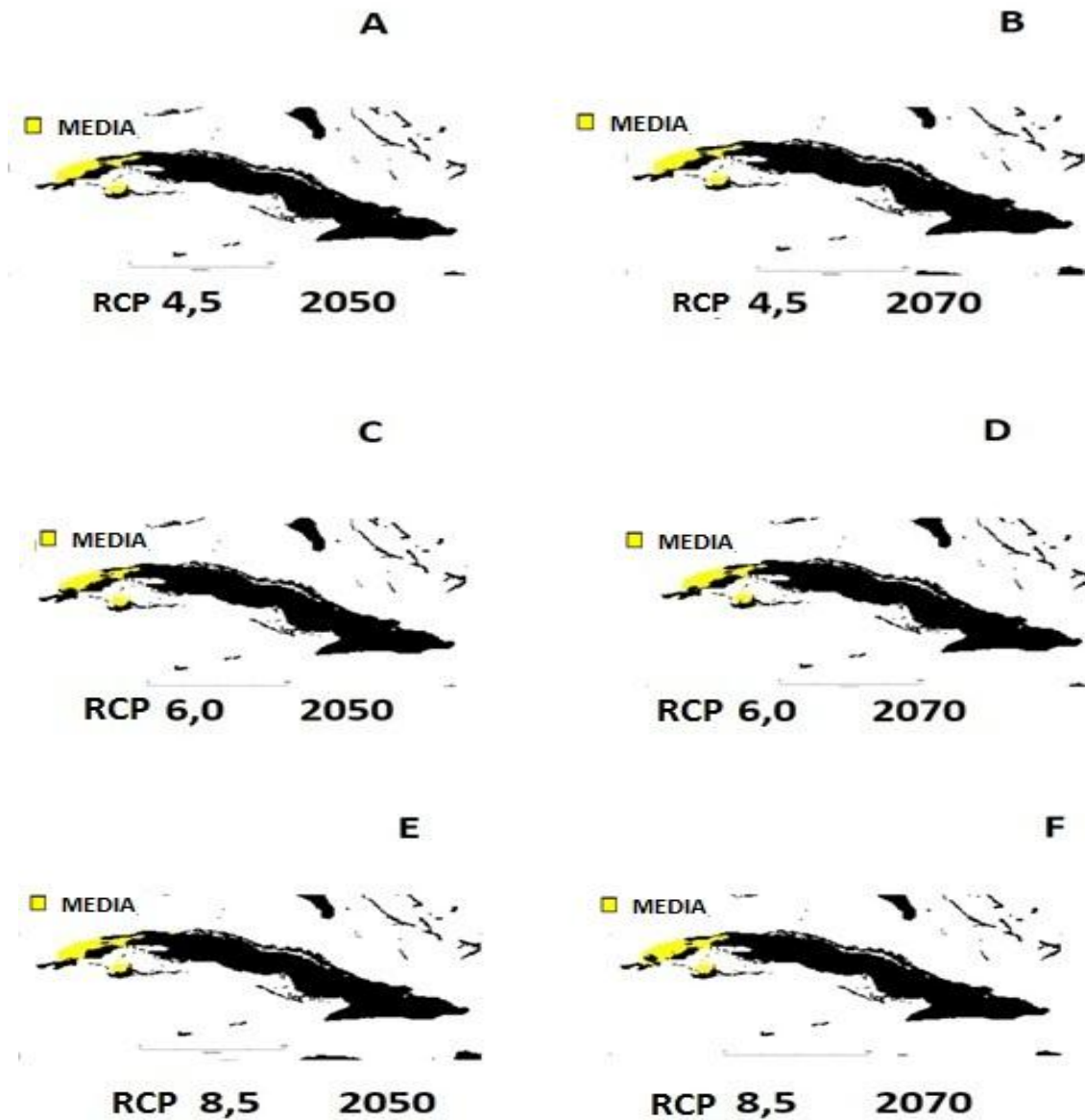
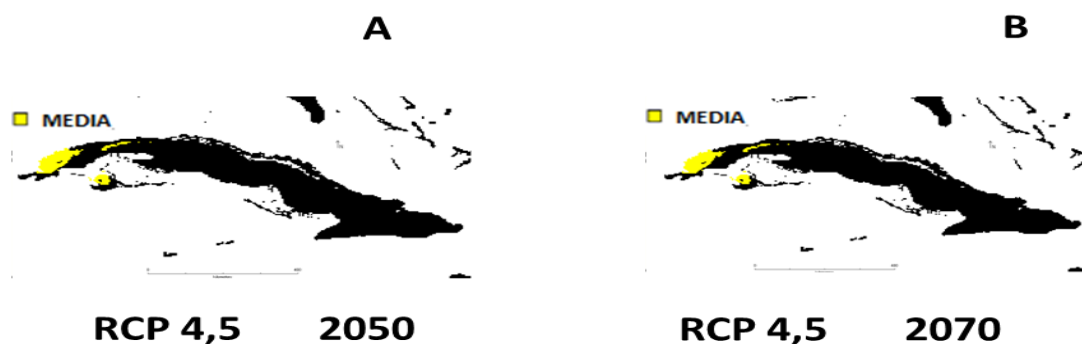


Figura 14. Comportamiento pronosticado de la aptitud ambiental de *Pinus caribaea* para los RCP 4,5, 6,0 y 8,5 en los años 2050 y 2070

#### 4.1.2 Predicción de hábitats potenciales para diferentes RCP en *Pinus tropicalis*

La Figura 15 muestra los mapas de aptitud ambiental para *Pinus tropicalis* en Cuba bajo los RCP 4,5, 6,0 y 8,5. Las regiones con categoría de aptitud media se encuentran en la región occidental de Cuba y abarcan la Cordillera de Guaniguanico incluyendo las Alturas de Pizarras del Norte y del Sur. Por el Sur se extienden desde Sandino, Bermejales en el municipio La Palma hasta Sierra del Rosario en Artemisa. Además, se extiende por la parte occidental de las Alturas de Bejucal-Madruga-Coliseo hacia el noreste hasta Escaleras de Jaruco. Sin embargo, el hábitat para Sierra del Rosario, las Colinas de Bejucal-Madruga y las Escaleras de Jaruco, presentan una barrera edáfica que le impide a la especie *Pinus tropicalis* su extensión hacia el Este.

En la Isla de la Juventud ocupa la parte central y noroeste del territorio. No existen categorías de aptitud baja y alta en el resto del país. Sin embargo, los mapas de probabilidades de presencia (Anexo 2) indican probabilidades muy bajas, por debajo del 30% y por ende por debajo del umbral del décimo percentil, para áreas ubicadas en la Habana, el Norte de Matanzas hasta el centro y Sur de la provincia de Sancti Spiritus (Alturas de Santa Clara y la porción Norte de Escambray).



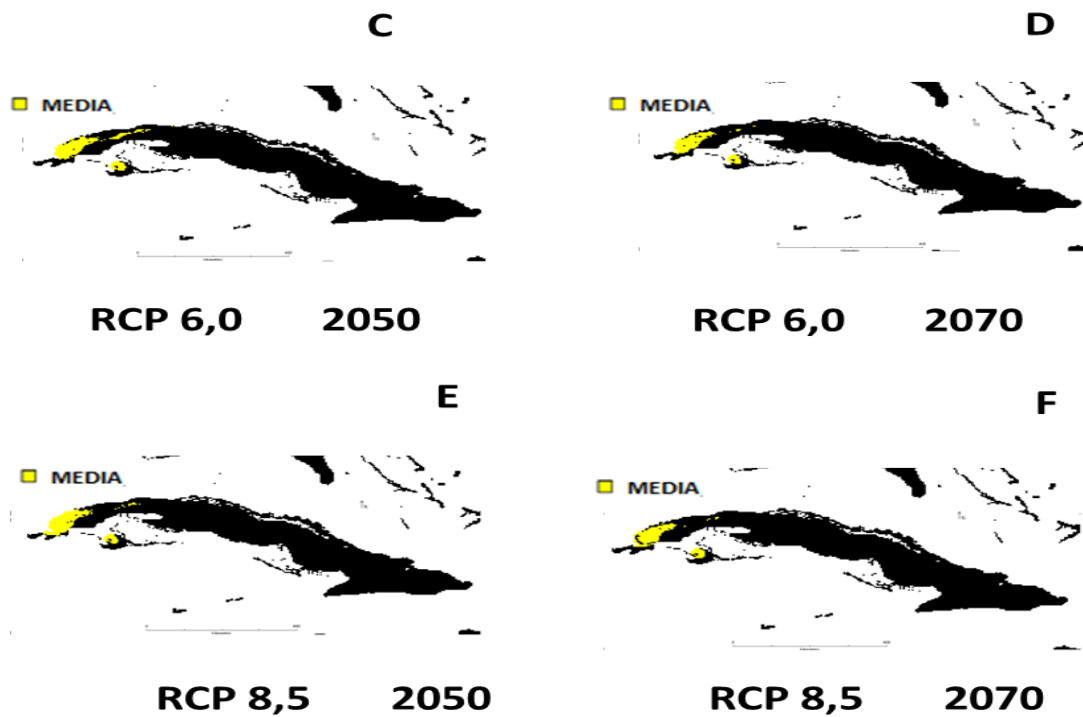


Figura 15. Comportamiento pronosticado de la aptitud ambiental de *Pinus tropicalis* para los RCP 4,5, 6,0 y 8,5 de los años 2050 y 2070

En resumen, estos resultados muestran claramente que ambas especies tienen sus nichos ecológicos definidos solo en la parte occidental de Cuba, fundamentalmente en Pinar del Río y la Isla de la Juventud. Por lo tanto, una medida proactiva de adaptación al cambio climático pudiera ser reconsiderar realizar plantaciones de las especies fuera de los lugares de hábitats potenciales (Figura 14 y Figura 15).

Asimismo, se aprecia que aun empleando un modelo global, con limitaciones para su desempeño en condiciones de insularidad en las proyecciones (Karmalkar *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2015) hubo desplazamientos del nicho climático hacia el Oeste para *P. tropicalis* mientras que para *P. caribaea* fueron ligeramente al Este.

Estudios predictivos similares a este en especies de coníferas (Sáenz-Romero *et al.*, 2006; 2011; 2012b; Gray y Hamann, 2012; Sáenz-Romero, 2014; Mendoza-Maya *et al.*, 2015; Rehfeldt *et al.*, 2015) demostraron que la modelación con MDE ha sido una herramienta práctica para los decisores de CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) en México, USDA *Forest Service* (Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), u otra institución sobre la definición de áreas de conservación, para relocalizar material proveniente de programas de mejoramiento, de fuentes semilleras y facilitando la migración asistida (ver Sáenz-Romero, 2014). Sin embargo, resulta válido señalar que estos estudios se han realizado con especies de amplia distribución geográfica, donde los modelos climáticos globales tienen buen ajuste. Por otra parte, estudios más refinados emplean, además variables de “background” y/o ambientales de tipo topográfico y la exposición, entre otras (Rehfeldt *et al.*, 2015; Koo *et al.*, 2015).

En resumen, las modelaciones con los RCP muestran muy poca variación espacial de las variables climáticas debido a la resolución del modelo. En el caso de las islas, al estar rodeadas de grandes masas de agua y disponer de poca densidad de estaciones meteorológicas, hace que las condiciones de fronteras incidan en el modelo de forma negativa, lo que hace aún más difícil simular con mejor precisión los cambios espaciales de las variables climáticas (Campbell *et al.*, 2010; Karmalkar *et al.*, 2013, Planos-Gutiérrez *et al.*, 2013; Rehfeldt *et al.*, 2015). Por su parte Benito-Garzón (2006), plantea que cuando se realiza la modelación de distribución de especies hay que tener en cuenta aspectos importantes



como la escala y la resolución, pues estos provocan notables efectos en el análisis. Es por ello que los MCG a veces para el caso de las islas no son apropiados.

En la amplia bibliografía existente se encuentran algunos modelos que han sido implementados a escala continental (Hansen *et al.*, 2001; Thuiller *et al.*, 2009; Gutiérrez y Trejo, 2014; Rehfeldt *et al.*, 2015), mientras que otros lo han hecho a escala regional (Trisurat *et al.*, 2009; Koo *et al.*, 2015; Cobos-Cobos, 2016), todos ellos muestran la preferencia por modelos regionales en condiciones insulares. La resolución de los datos puede afectar la escala de modelación, por lo que cuando se modelan supuestos de cambio climático es importante analizar los resultados a varias escalas.

A pesar de las imprecisiones propias del modelo, en sus resultados sugiere que hasta finales del siglo XXI los pinares naturales de *P. caribaea* deben mantenerse, y a su vez encontrar nuevos nichos climáticos potenciales adecuados para su desarrollo, aunque no existirían estos con aptitud ambiental alta.

Adicionalmente, si se reconoce que ocurrirá un incremento estimado de la temperatura media global, una reducción de las precipitaciones sobre todo en el período lluvioso (ECLAC, 2010; República de Cuba, 2015) e incremento de la recurrencia e intensidad de los eventos extremos de sequía, que pudieran a su vez incrementar el peligro de incendios rurales, aparición de plagas (Álvarez-Brito *et al.*, 2004; Lapinel-Pedroso *et al.*, 2006; Álvarez-Brito y Mercadet-Portillo, 2011; Sáenz-Romero, 2014), entonces sería importante tomar en consideración los MDE al unísono con las evaluaciones de la variabilidad genética, para la toma de decisiones y el establecimiento de los nuevos programas de desarrollo forestal y de conservación.

## **4.2 Predicción de hábitats potenciales con SRES A2 y B2 a partir del modelo climático regional PRECIS-CARIBE en el occidente de Cuba**

### **4.2.1 Predicción de hábitats potenciales para *Pinus caribaea***

La Figura 16A-D muestra los resultados de la modelación en términos de hábitats potenciales para *Pinus caribaea* en el escenario SRES A2. Inicialmente, se aprecia que en todos los cortes correspondientes a corto, mediano y largo plazo predominan las áreas con aptitud ambiental baja ubicadas en la parte noreste de Pinar del Río, en los municipios Viñales, La Palma, el Norte de Consolación del Sur, y todo el centro Oeste de la Isla de la Juventud. Los pronósticos de aptitud ambiental media bordean las áreas con aptitud ambiental alta, que hoy son los núcleos históricos de distribución natural de la especie, en la Meseta de Cajálbana y al suroeste en las Alturas de Pizarras del Sur desde El Naranjo en Viñales hasta Galalón en La Palma.

Adicionalmente, se observa un incremento en el área total pronosticada para las diferentes aptitudes ambientales, pero con una ligera tendencia de desplazamiento hacia el Este respecto a su distribución actual en Pinar del Río y hacia el noreste en la Isla de la Juventud. De manera muy singular, se estima además que a mediano plazo (2050-2070) ocurra una disminución del nicho climático, el cual nuevamente tendrá una tendencia al incremento hasta el año 2099, lo cual pudiera adjudicarse a que durante ese periodo y como parte del proceso de variabilidad climática, se encontraría en una etapa de mayor estabilidad en las variables del clima.

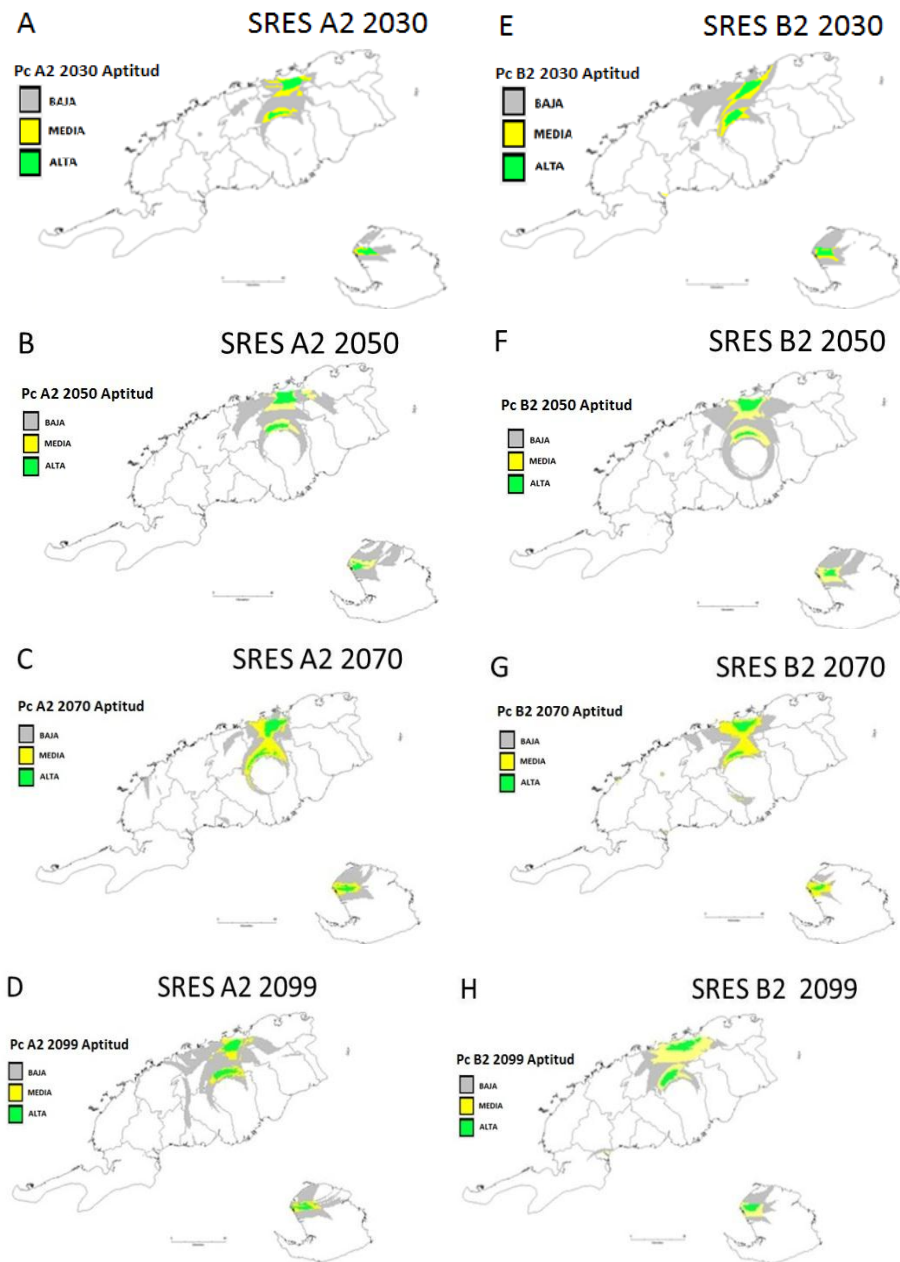


Figura 16. Aptitud ambiental estimada para los pinares de *Pinus caribaea* en el occidente de Cuba con PRECIS-CARIBE (ECHAM4) para los escenarios SRES A2 y SRES B2

Por su parte, en el escenario SRES B2 las proyecciones (Figura 16E-H) muestran que las áreas con aptitud ambiental alta para todos los cortes se mantienen con muy poco cambio en su localización con relación a las áreas actuales de la Meseta de Cajalbana y al suroeste en las Alturas de Pizarras desde El Naranjo en Viñales hasta Galalón en La Palma; a mediano plazo

se espera una disminución en área en la Isla de la Juventud y Galalón, municipio La Palma, en Pinar del Río (Figura 16F y G).

Las áreas con aptitud ambiental media bordean las zonas de aptitud alta y se extienden principalmente en dirección Norte-Sur, ocupando toda la parte central y costa norte de La Palma en Pinar del Río y el noroeste en la Isla de la Juventud, sobre todo para los períodos 2030 y 2050 (Figura 16E y F).

El análisis comparativo para el SRES A2, entre las áreas con hábitats potenciales para cada corte, la línea base y el área actual ocupada muestra una pérdida en área de aptitud alta de aproximadamente 7 000 ha (casi el doble) para el año 2050 respecto al 2030 (Figura 17A,).

De manera general, se estima una tendencia al crecimiento de los nichos ecológicos con aptitud ambiental baja seguida de media. Se estima que el nicho climático sea de unas 102 000 ha, mayor al área potencial actual.

Específicamente, condiciones menos favorables se presentarán en la Isla de la Juventud y en la zona de Galalón en el municipio de La Palma, Pinar del Río, mientras que para el largo plazo mantendrá su incremento. Para el SRES B2 las mayores variaciones se aprecian en los pronósticos de áreas con aptitud ambiental baja. Estas ocupan las mayores extensiones y tienden a tener un crecimiento sostenido hasta el 2050, que luego a largo plazo tienden a casi igualarse con las de aptitud media hasta el 2099 (Figura 17B). En este las áreas de aptitud ambiental media prevé un crecimiento constante hasta el 2099 de unas 25 700 ha respecto a la cifra actual, mientras que la aptitud ambiental alta es en la que menos crecimiento se estima.

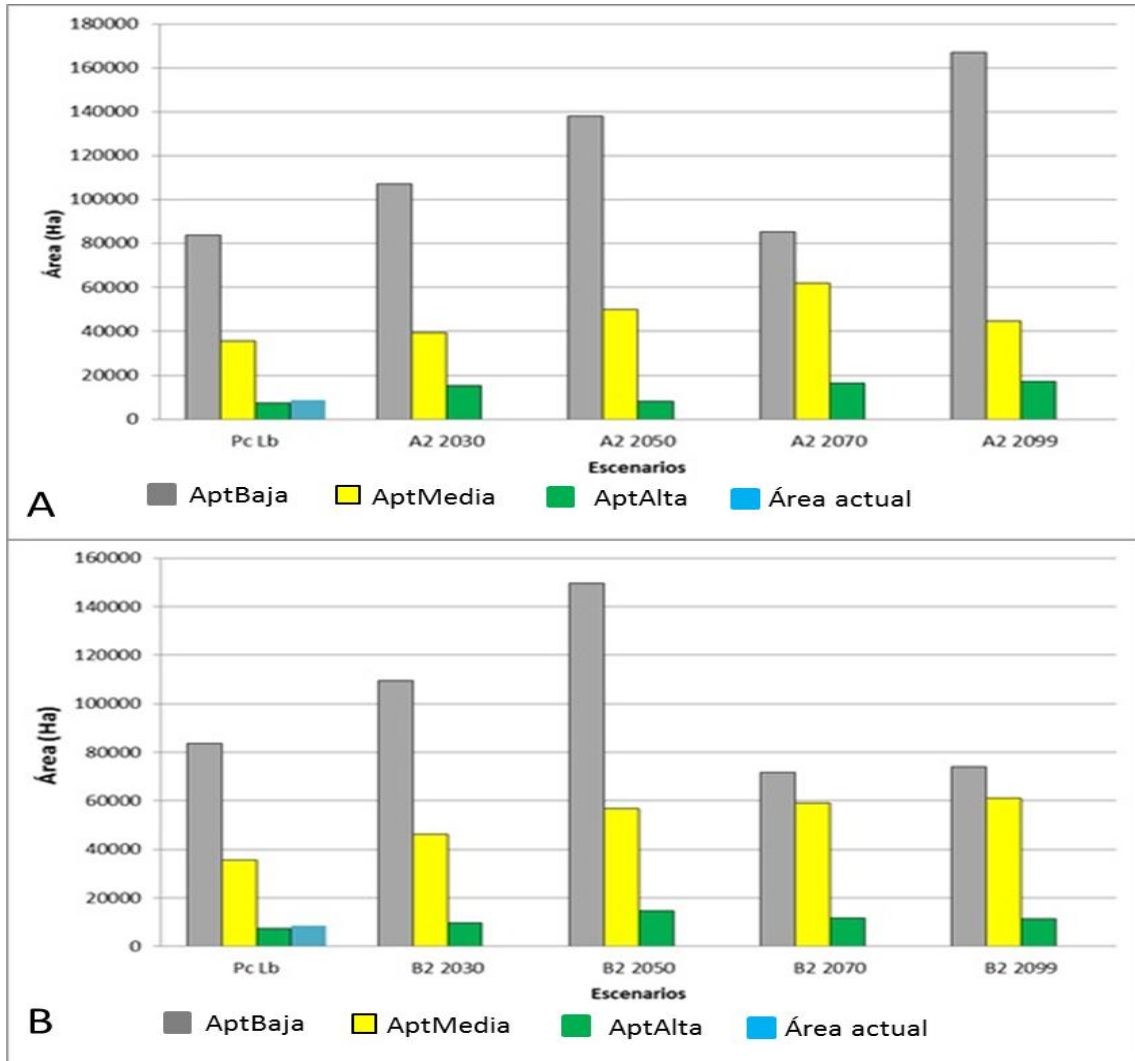


Figura 17. Total de área con aptitudes ambientales potenciales para *Pinus caribaea* con el modelo PRECIS-CARIBE, A. SRES A2, B. SRES B2. Nota: *P.c Lb* (área potencial para el clima observado 1961-1990).

Para *Pinus caribaea* ambos escenarios sugieren que se presentarán condiciones climáticas favorables para el desarrollo y posible expansión de sus áreas ocupadas, pero con un ligero desplazamiento al Este (ver Figuras 16) que es donde se estima predominen las aptitudes altas y medias.

Comparando el total de áreas pronosticadas en ambos SRES A2 y SRES B2 se vaticina un incremento de las áreas para todas las aptitudes ambientales para *Pinus caribaea* hasta el año 2099, con predominio de aptitud baja seguido de aptitud media. Para el final del período 2070-2090 la diferencia se hace mayor en los resultados del área total pronosticada para cada aptitud.

#### **4.2.2 Predicción de hábitats potenciales para *Pinus tropicalis***

Para el escenario SRES A2 (Figura 18A-D) la modelación muestra para la Isla de la Juventud que las áreas con hábitats potenciales quedaron reducidas a muy pequeños fragmentos de aptitud ambiental baja, es decir prácticamente desaparece el nicho climático de esta especie en este territorio. Por el contrario, para la provincia de Pinar del Río se prevé un incremento en área de las aptitudes ambientales media y alta, en particular para las zonas de Macurijes en el municipio Mantua, municipios Minas de Matahambre, San Juan y Martínez, Guane, fragmentos en Viñales y Galalón en el municipio La Palma. En este territorio, la aptitud baja será muy inferior en área y se localizarán en la periferia de las restantes. Resumiendo para SRES A2, se pronostica un desplazamiento al Oeste con relación a la posición actual ocupada, así como a la obtenida en la línea base (Figura 11).

Se pronostica para SRES B2 (Figura 18E-H) un predominio de la aptitud ambiental media seguida de alta para el territorio de Pinar del Río. Se aprecia en todas las proyecciones un desplazamiento al Oeste con relación a la línea base (Figura 11) además con respecto a las áreas ocupadas actualmente (Figura 1B), todas ellas en los municipios Mantua, Minas de Matahambre y Guane en Pinar del Río (Figura 18F-H). De igual forma que la predicción para SRES A2, se proyecta un fragmento de área con aptitud ambiental alta o media localizado en

las Alturas de Pizarra del Sur sobre la zona entre Juan Brans y las Calderas, al Sur en los límites de los municipios Viñales y la Palma.

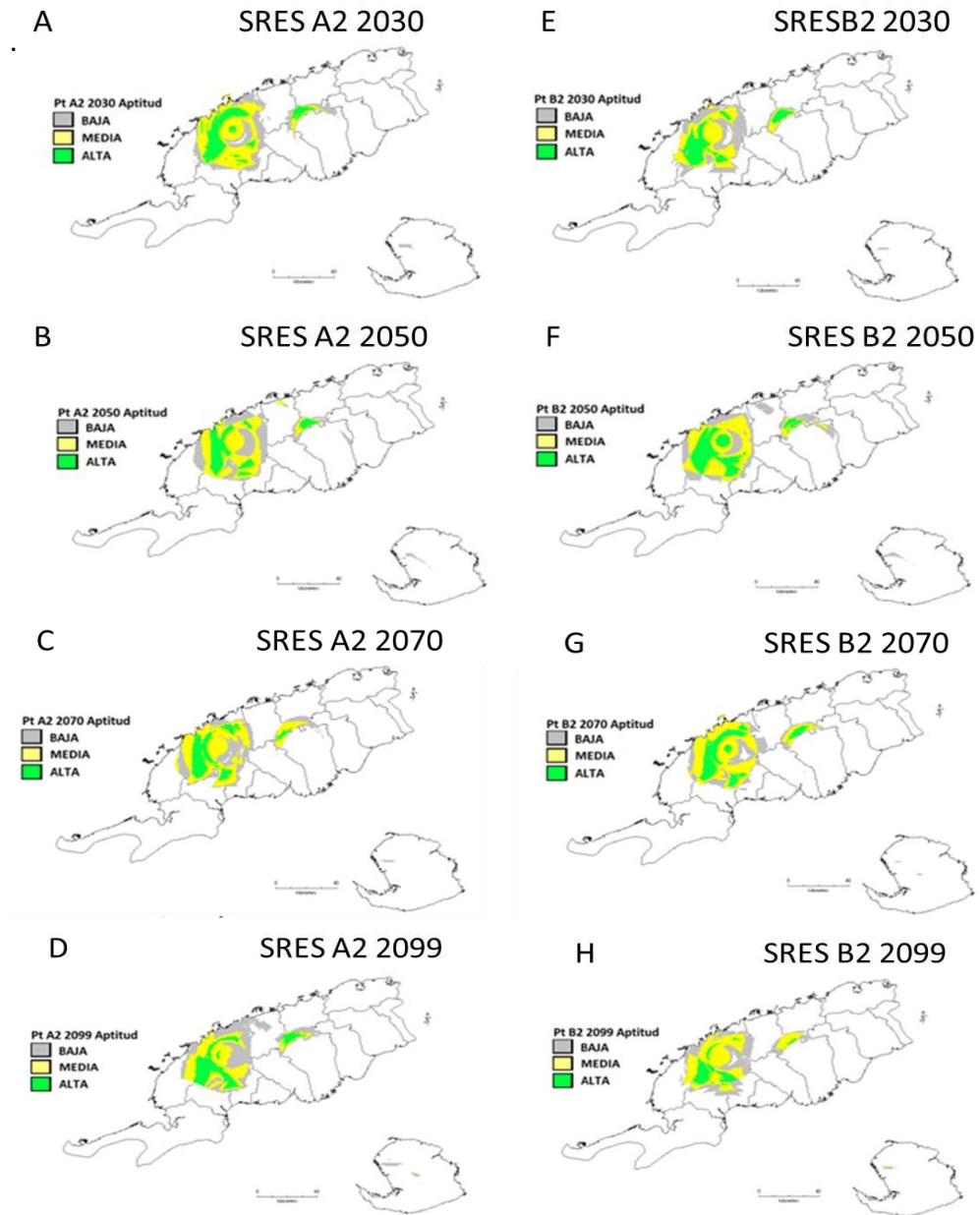


Figura 18. Aptitud ambiental estimada para los pinares de *Pinus tropicalis* en el occidente de Cuba, con PRECIS-CARIBE (ECHAM4) para SRES A2 y SRES B2

Sorprendentemente, en ambos escenarios las proyecciones muestran la existencia de dos sectores independientes que constituirían nichos climáticos para la especie, pero estos

sectores tanto en la línea base (Figura 11) como en la distribución actual de la especie están interconectados (Figura 1).

La Figura 19A muestra una tendencia al incremento de aproximadamente el doble en áreas con aptitud ambiental alta hasta el 2099, mientras que la aptitud media y baja se mantienen aproximadamente iguales para los diferentes plazos.

De manera general para este escenario, se estima una tendencia al crecimiento de los nichos en 41 800 ha respecto a la línea base, en este caso se incrementan las potencialidades en aptitud media y alta. Mientras que para SRES B2 (Figura 19B) la tendencia será al incremento en casi el doble para la aptitud alta, la media ocupará las mayores áreas y mostrará similar comportamiento, no así con la baja que se espera muy poca variación hasta el 2099 (Figura 19B).

Comparando las predicciones entre los escenarios SRES A2 y SRES B2 se puede apreciar que entre los períodos 2030 y 2050 existe una mayor diferencia del área pronosticada. Se muestra un predominio de las áreas con aptitud media seguida de la aptitud baja. Por último, se estima un crecimiento de las áreas con aptitud ambiental favorables para *Pinus tropicalis* con relación al área ocupada actual. Esto refuerza la idea de mantener y sustentar los planes de plantación y reforestación con esta especie para los municipios Mantua, Guane, Minas de Matahambre y San Juan y Martínez. Así como facilitar esfuerzos en la creación o reacondicionamiento de sus fuentes semilleras.



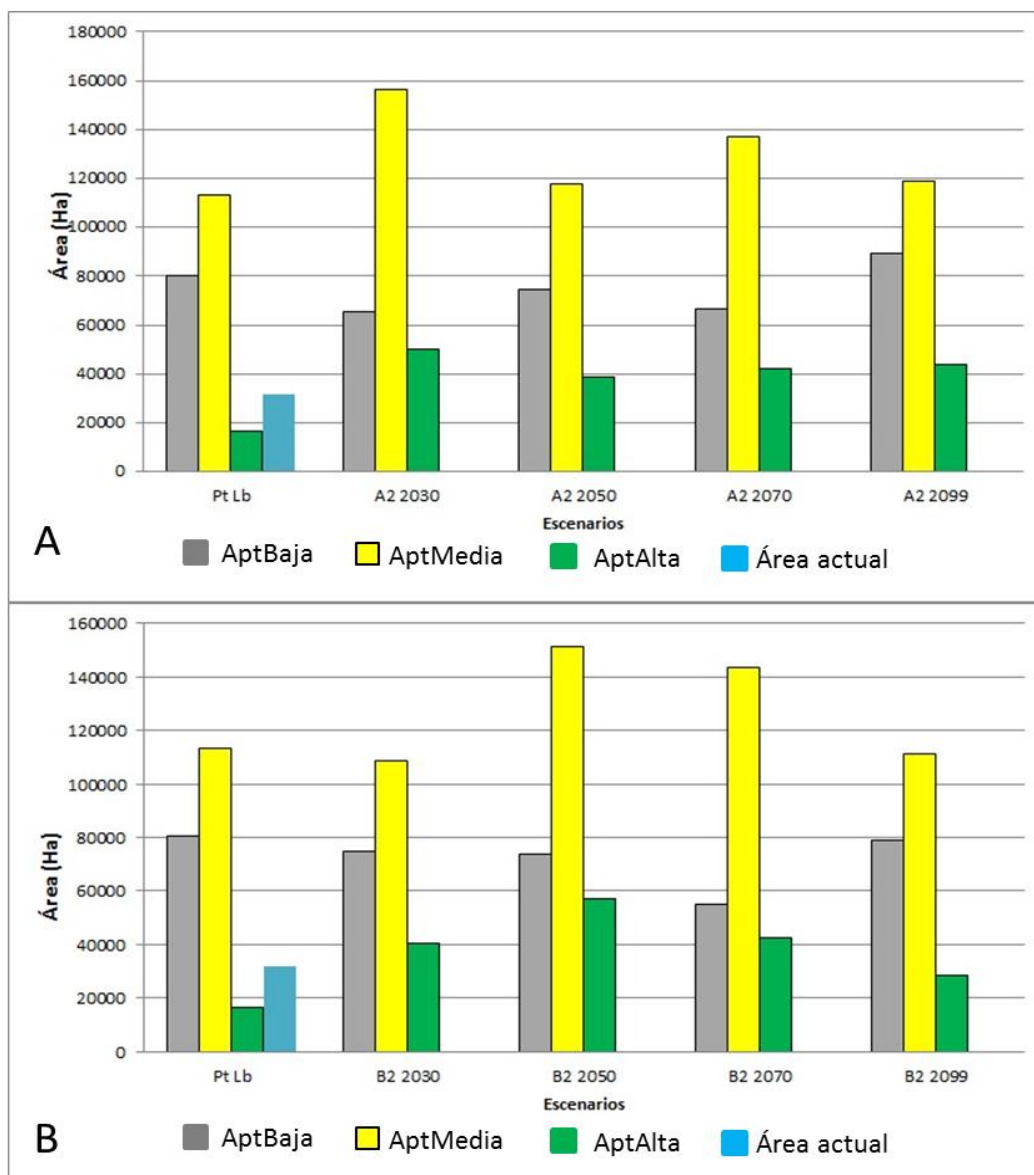


Figura 19. Total de área con aptitudes ambientales potenciales para *Pinus tropicalis*. Modelo PRECIS-CARIBE, A. SRES A2, B. SRES B2

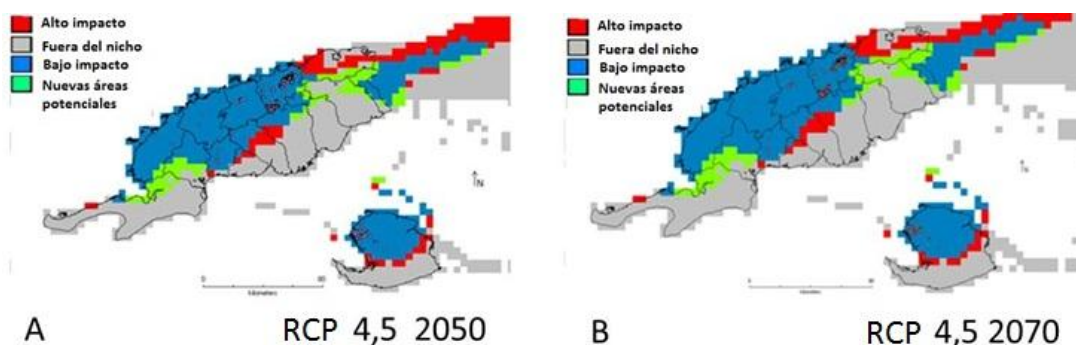
Nota: *P.t Lb* (área potencial para el clima observado 1961-1990)

### 4.3 Impacto del cambio climático en la disponibilidad de hábitats para pinares de *Pinus caribaea* y *Pinus tropicalis* en el occidente de Cuba

#### 4.3.1 Predicción de los impactos del cambio climático para diferentes RCP a partir del modelo climático global HadGEM-ES (CMIP5)

##### 4.3.1.1 Predicción de impactos del cambio climático en la distribución de *Pinus caribaea*

Para los diferentes RCP, así como períodos de corte temporal (2050 y 2070), se estima bajo impacto en áreas donde en la actualidad la especie se distribuye naturalmente (Figura 20; Figura 1B), este bajo impacto se relaciona con áreas de aptitud ambiental (baja, media y alta) previamente definidas en la línea base (Figura 5). Los mapas además, muestran la aparición de nuevas áreas al Oeste de la zona de arenas blancas en San Ubaldo – Sabanalamar (Figura 20), un área más pequeña al Este de Cajálbana en el municipio La Palma y al Sur del municipio Bahía Honda; y una expansión más al Sur, hacia los municipios San Cristóbal y Candelaria. Sin embargo, no se pronostican nuevas áreas potenciales en la Isla de la Juventud, donde se estima alto impacto en la periferia de la zona de bajo impacto que se extiende en dirección Este a Oeste en el centro del territorio. Resumiendo, de acuerdo a las proyecciones, la disponibilidad de nuevas áreas en el clima a futuro son muy reducidas.



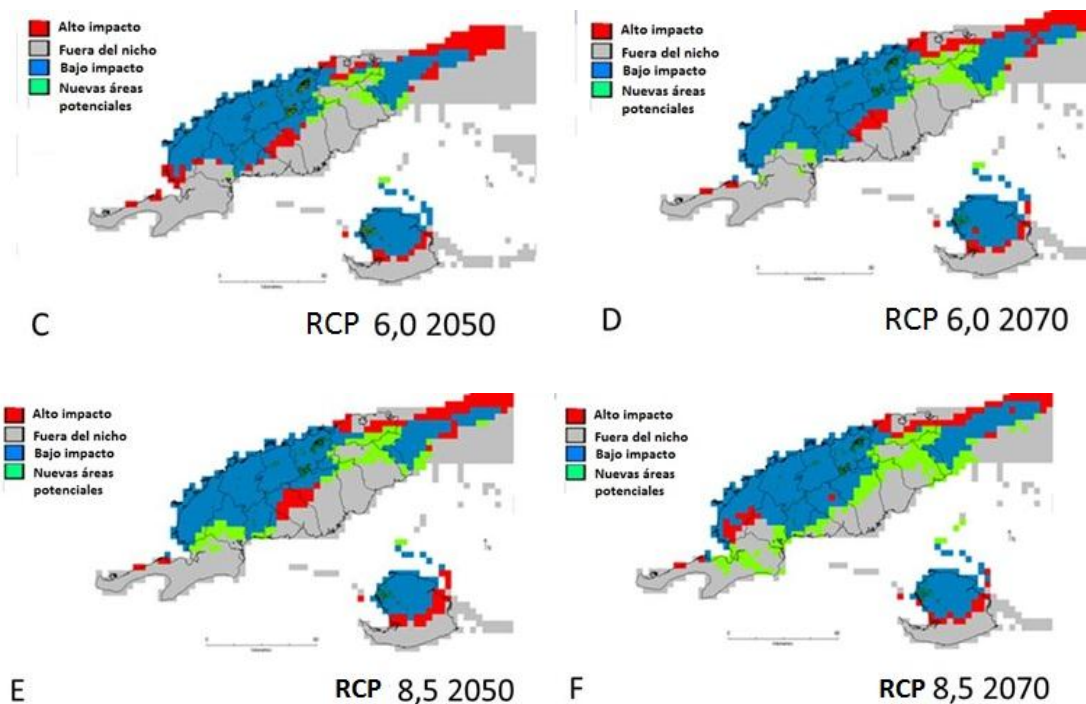


Figura 20. Impactos del cambio climático esperados a los hábitats potenciales de *Pinus caribaea* para diferentes RCP 4,5; 6,0 y 8,5

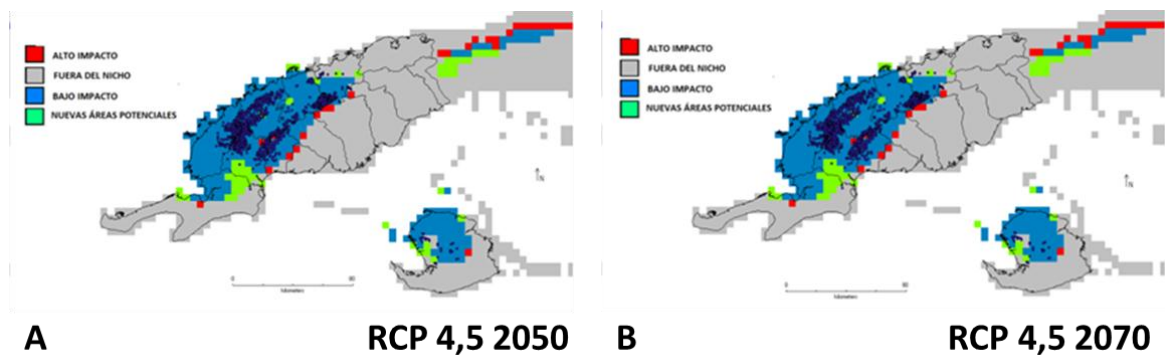
Un alto impacto se pronostica en las Alturas de Pizarra del Sur, sobre los municipios Pinar del Río y Consolación del Sur; al centro de Bahía Honda (Figura 20B y D), en algunos casos (Figura 20C y F) sobre Montezuelo y Blanquizar en el municipio de Mantua, en Pinar del Río; e invariablemente en la zona norte de Artemisa. Las tierras de la llanura Sur de Pinar del Río y al Sur de Artemisa, así como áreas de suelos calizos de la Península de Guanahacabibes, Sur de la Isla de la Juventud, Cabañas y Mariel están fuera del nicho de la especie.

En general, el modelo sobreestima las áreas climáticas de bajo impacto extendiéndolas muy al Oeste, donde nunca han sido pronosticadas aptitudes ambientales (Figura 5, línea base) para la especie. Esto pudiera ser a causa de la resolución espacial del modelo climático global; y otra subyace en la dispersión de algunos rodales de *Pinus caribaea* en climátos

más al Oeste, próximos o en simpatría con los de *Pinus tropicalis*. En este caso entonces, se estaría en presencia de un error de estimación predictiva propia del modelo por su carácter global.

#### 4.3.1.2 Predicción de impactos de cambio climático en la distribución de *Pinus tropicalis*

Los impactos estimados a *Pinus tropicalis* (Figura 21) muestran que para el 2050 y el 2070 se prevé un bajo impacto en las áreas ocupadas por la especie en la actualidad en el occidente de la Isla de Cuba e Isla de la Juventud. La probabilidad de nuevas áreas potenciales son reducidas y se extenderán (Figura 21) en el espacio comprendido entre el Sur de Los Portales, Las Catalinas, Isabel Rubio y Sandino, sin llegar a la Península de Guanahacabibes con la excepción de RCP 8,5 (Figura 21E). Sin embargo, es reconocido que la Península no permite el desarrollo de la especie (Samek y Del Risco-Rodríguez, 1989; Del Risco-Rodríguez y Samek, 1995; Del Risco-Rodríguez y Reyes-Domínguez, inédito). Por otra parte, en la Isla de la Juventud se concentran en el centro-oeste cubriendo Maniadero y La Victoria, edafótopos conocidos de arenas blancas.



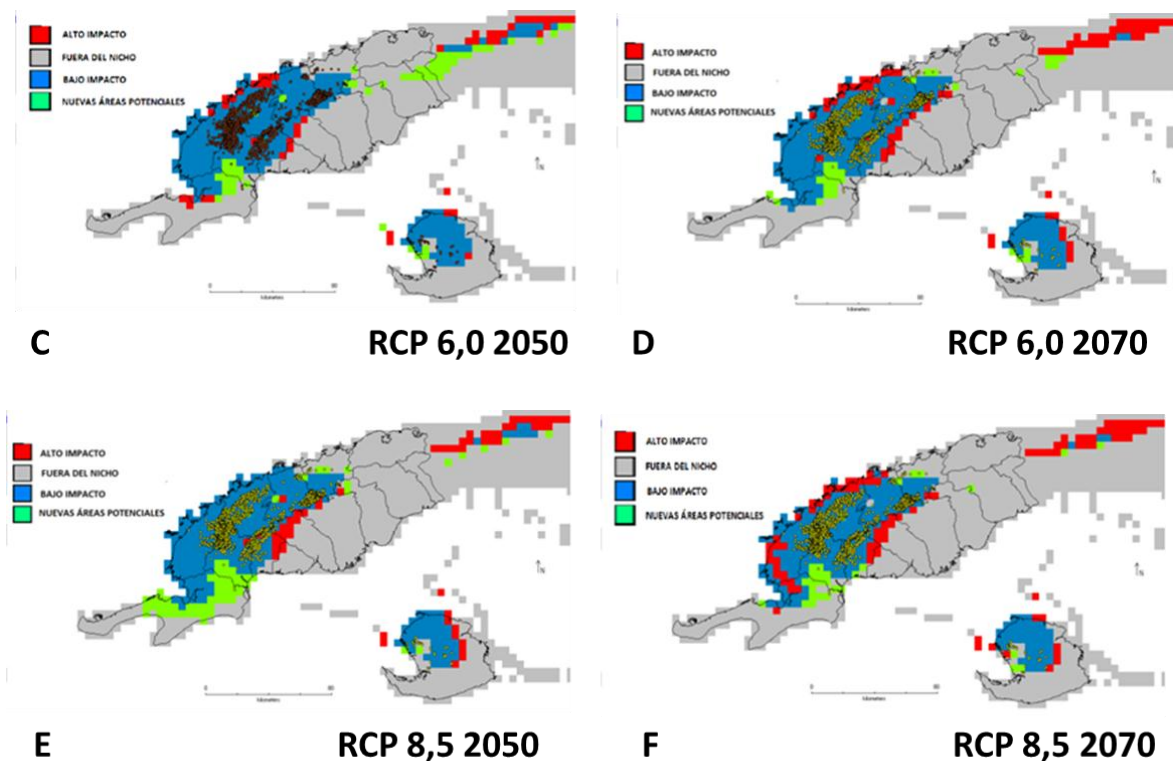


Figura 21. Impactos del cambio climático esperados a los hábitats potenciales de *Pinus tropicalis* para diferentes RCP 4,5; 6,0 y 8,5

La categoría alto impacto es la menos representada por el modelo (Figura 21), esta se delinea como estrechas franjas entre áreas fuera del nicho y las áreas de bajo impacto, en especial en las Alturas de Pizarra del Sur desde San Luis hasta Consolación del Sur. Es importante señalar que los rodales naturales de la especie no se distribuyen en áreas con predicción de alto impacto, sin embargo, la localidad de Ceja del Negro se localiza muy próxima a esta categoría.

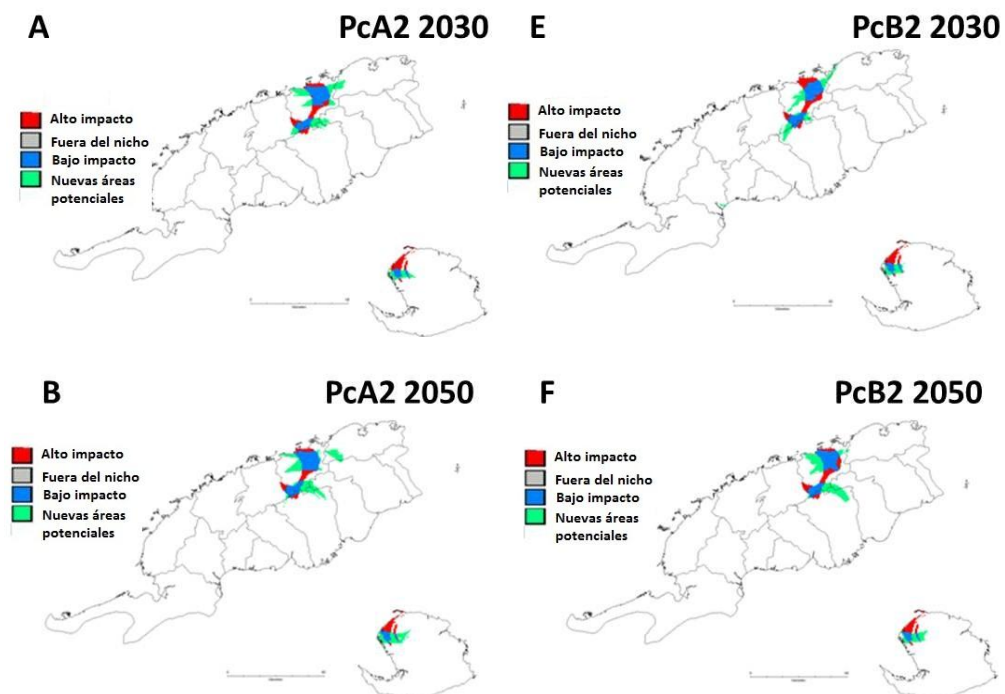
Igual que en el caso anterior, la precisión en los resultados con los modelos climáticos globales se ven afectados por la posible sobreestimación, dado esto por la poca resolución al ser Cuba una isla estrecha.

### 4.3.2 Predicción de los impactos del cambio climático a pinares de *Pinus caribaea* y *Pinus tropicalis* para diferentes escenarios de emisiones (SRES) a partir del modelo climático regional PRECIS-CARIBE

#### 4.3.2.1 Predicción del impacto a *Pinus caribaea* para los SRES A2 y B2

Es estos casos, las proyecciones de impacto, son mucho más refinadas que cuando se emplean los modelos globales, y en especial si se modela sobre la interpolación de las variables con una mejor resolución espacial, por lo que es posible realizar una mejor evaluación del impacto.

Cuando se proyectó con el SRES A2 (Figura 22A-D) con un modelo regional, se obtuvo la predicción de un bajo impacto en las áreas más densamente ocupadas por la especie en la actualidad, localizadas en Cajálbana en el municipio La Palma; desde Murguía en el municipio Viñales hasta San Andrés en el municipio La Palma, en Pinar del Río y el noroeste de la Isla de la Juventud.



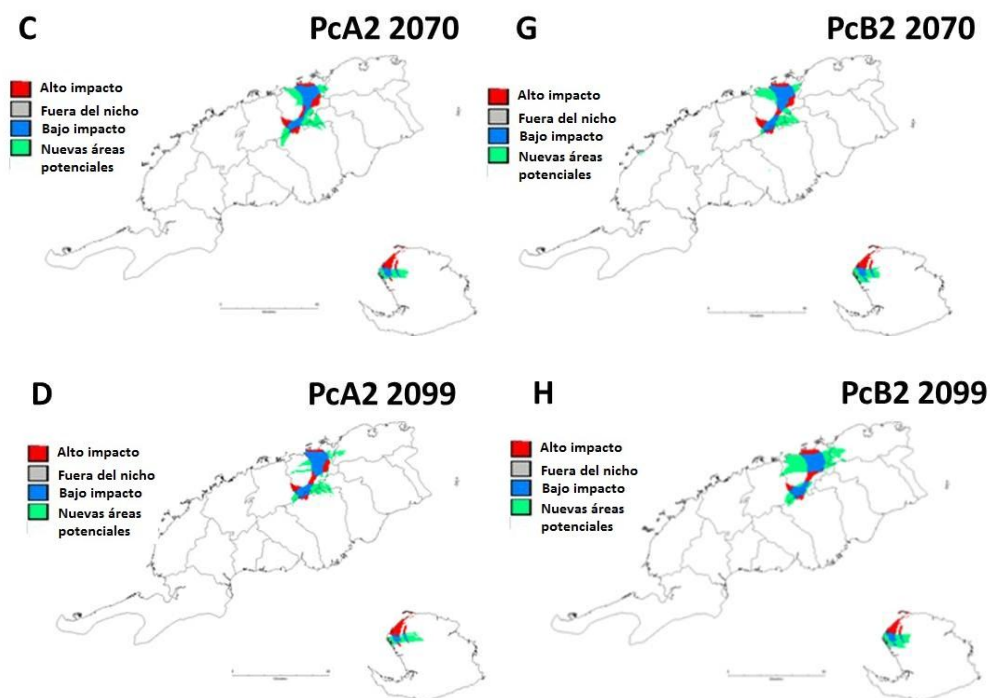


Figura 22. Impacto esperado en los pinares de *Pinus caribaea* a partir del modelo PRECIS-CARIBE para los escenarios SRES A2 y SRES B2 en el occidente de Cuba

El alto impacto se estima en una franja hacia el noreste desde San Andrés, pasando por Puerto Escondido y El Sitio hasta las proximidades del Sur de la Meseta de Cajálbana, todos en el municipio La Palma. Además una porción menor será afectada en la costa al Norte de Cajálbana hasta algo más al Oeste de Marbajita, en Los Jazmínez en el municipio Viñales, y en la Isla de la Juventud desde La Demajagua al noreste hasta Ciro Redondo. El resto de los rodales actuales (Figura 1), desde Pan de Azúcar en el municipio Minas de Matahambre hasta Valle Ancón en el municipio Viñales; La Ceja en La Palma; y desde Cabezas en Minas de Matahambre hacia el Sur-suroeste hasta Santa Damiana en San Juan y Martínez quedarán fuera del nicho bioclimático para todos los períodos, así como las áreas experimentales donde radica la Estación Experimental Agroforestal Viñales.

La aparición de nuevas áreas potenciales se encontrarán próximas a las áreas de bajo impacto aunque más al Este (Figura 22B, C y D), extendiéndose a partir del 2050 desde Cajálbana al Este hacia Rancho Canelo y Las Pozas, en el municipio Bahía Honda y hacia el Oeste hasta Canalete en La Palma llegando a la costa norte. Más al Sur, también aparecen al Este de San Andrés hasta Seboruco en Los Palacios, Pinar del Río. En la Isla de la Juventud también se amplía al Este desde Punta Buenavista, La Demajagua hasta La Melvis.

Una comparación entre los mapas de impacto del SRES A2 (Figura 22A-D) y los mapas de aptitud ambiental para la línea base (Figura 5B), muestran que de manera general, debe ocurrir un bajo impacto en aquellas áreas donde existe una aptitud ambiental alta en la actualidad. Sin embargo, el alto impacto se predice sobre las áreas que hoy se clasifican con aptitud media y algunas áreas con aptitud baja como en Bermejales, Galalón, Sierra La Güira, Marbajita, San Andrés y Canalete en el municipio La Palma en Pinar del Río, y en La Demajagua en la Isla de la Juventud. El surgimiento de nuevas áreas potenciales coincide con las áreas con aptitud baja en la actualidad.

Por otra parte, para el SRES B2 (Figura 22E-H) se espera impactos similares al SRES A2. El bajo impacto se estima que sucederá en las áreas hoy ocupadas con mayor densidad de rodales: Cajálbana en el municipio La Palma, desde Murguía en el municipio Viñales hasta San Andrés en La Palma en la provincia Pinar del Río, y en el noroeste de la Isla de la Juventud. Para los rodales naturales más dispersos se vaticina que pierdan las condiciones del nicho potencial a corto plazo, ya en el año 2030 desde Pan de Azúcar (municipio Minas de Matahambre) hasta Valle Ancón (municipio Viñales), La Ceja en La Palma y desde Cabezas (Minas de



Matahambre) hacia el Sur-suroeste hasta Santa Damiana (San Juan y Martínez) quedarán fuera del nicho climático.

Las nuevas áreas potenciales tienden a incrementarse a partir de las zonas de bajo impacto, con una leve tendencia a crecer más hacia el Este a partir del año 2070 (Figura 22F, G-H) desde Cajálbana hacia el noreste hasta La Mulata, y hacia el Oeste hasta Canalete en La Palma llegando a la costa norte. En San Ubaldo-Sabanalamar, al suroeste de la llanura Sur de Pinar del Río, para el año 2030 se estiman nuevas áreas climáticas potenciales muy pequeñas que desaparecerán rápidamente en el 2050 (Figura 22E).

Similarmente, para los SRES A2 y B2 (Figura 23) se observan pronósticos de crecimiento de nuevas áreas, seguido de las áreas de bajo impacto.

Sintetizando, de acuerdo a los impactos del cambio climático esperados para *Pinus caribaea* en el occidente de Cuba, deberán mantenerse los nichos climáticos favorables en las regiones de Cajálbana en La Palma, y al suroeste en la Alturas de Pizarras del Sur desde Murguía en el municipio Viñales hasta San Andrés en La Palma, Pinar del Río y al noroeste de la Isla de la Juventud donde se proyecta un bajo impacto.

Aún bajo predicciones de cambio en el clima, existirán potencialidades climáticas para el surgimiento de nuevas áreas, que ocurrirán de forma creciente con una tendencia al Este, y por tanto nuevas posibilidades para la planificación de áreas de plantación a gestionar con Planificación Física y los tenentes agropecuarios, por el encargo social de estos.

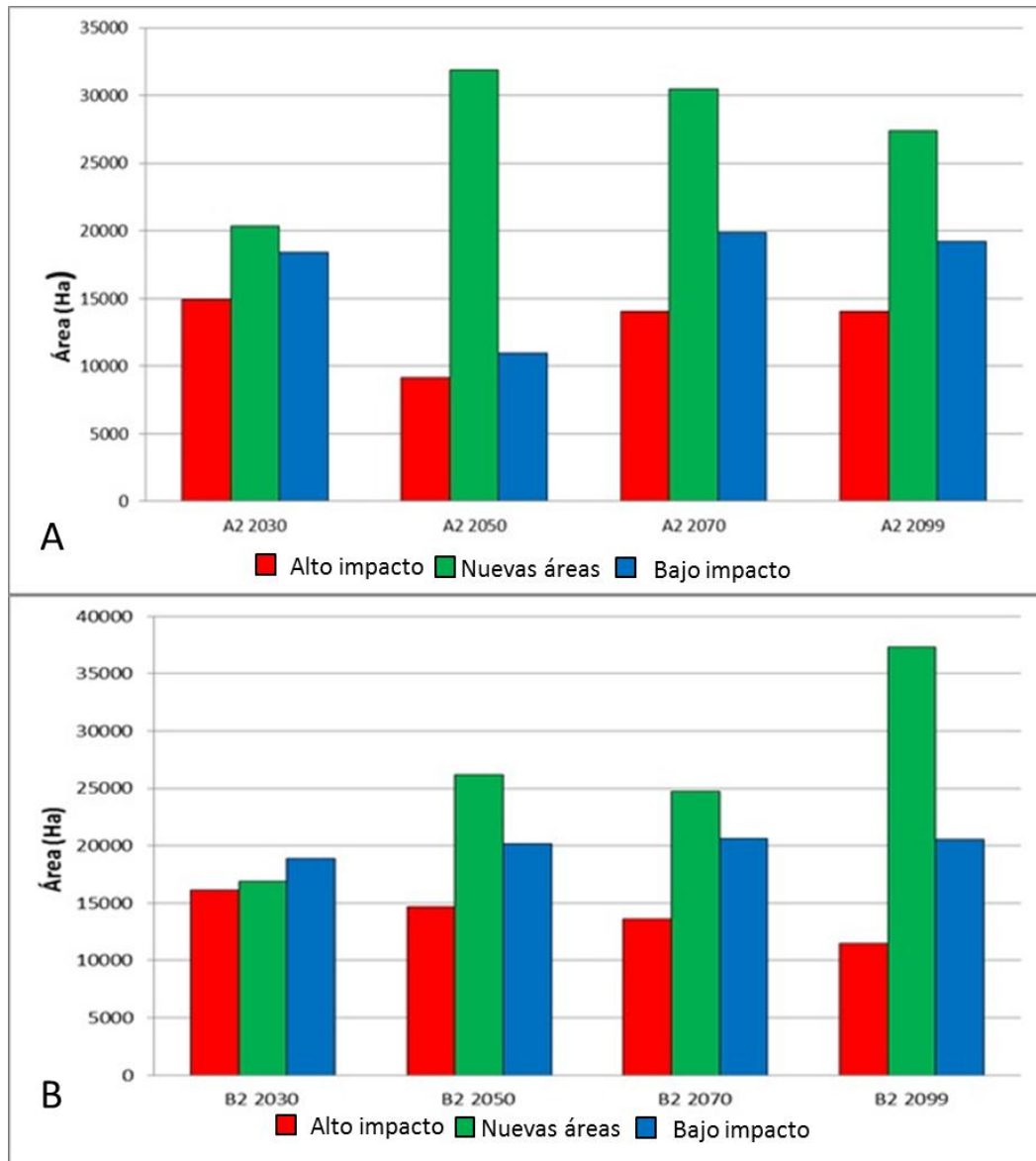


Figura 23. Distribución por áreas de impacto (hectáreas) en *Pinus caribaea* para los escenarios: A. SRES A2, B. SRES B2 en el occidente de Cuba

Las diferencias entre el área climática pronosticada para los distintos impactos, analizados en ambos escenarios de emisiones, se hacen más marcadas con el aumento del plazo en la predicción. Por lo tanto, si se extiende en el tiempo la predicción llevaría implícito el incremento en la incertidumbre del área de pronóstico a esos plazos. De ahí que sea

necesario, un sistema de actualización, o sea reestimación de los climas futuros (Karmalkar *et al.*, 2013; Planos-Gutiérrez *et al.*, 2013).

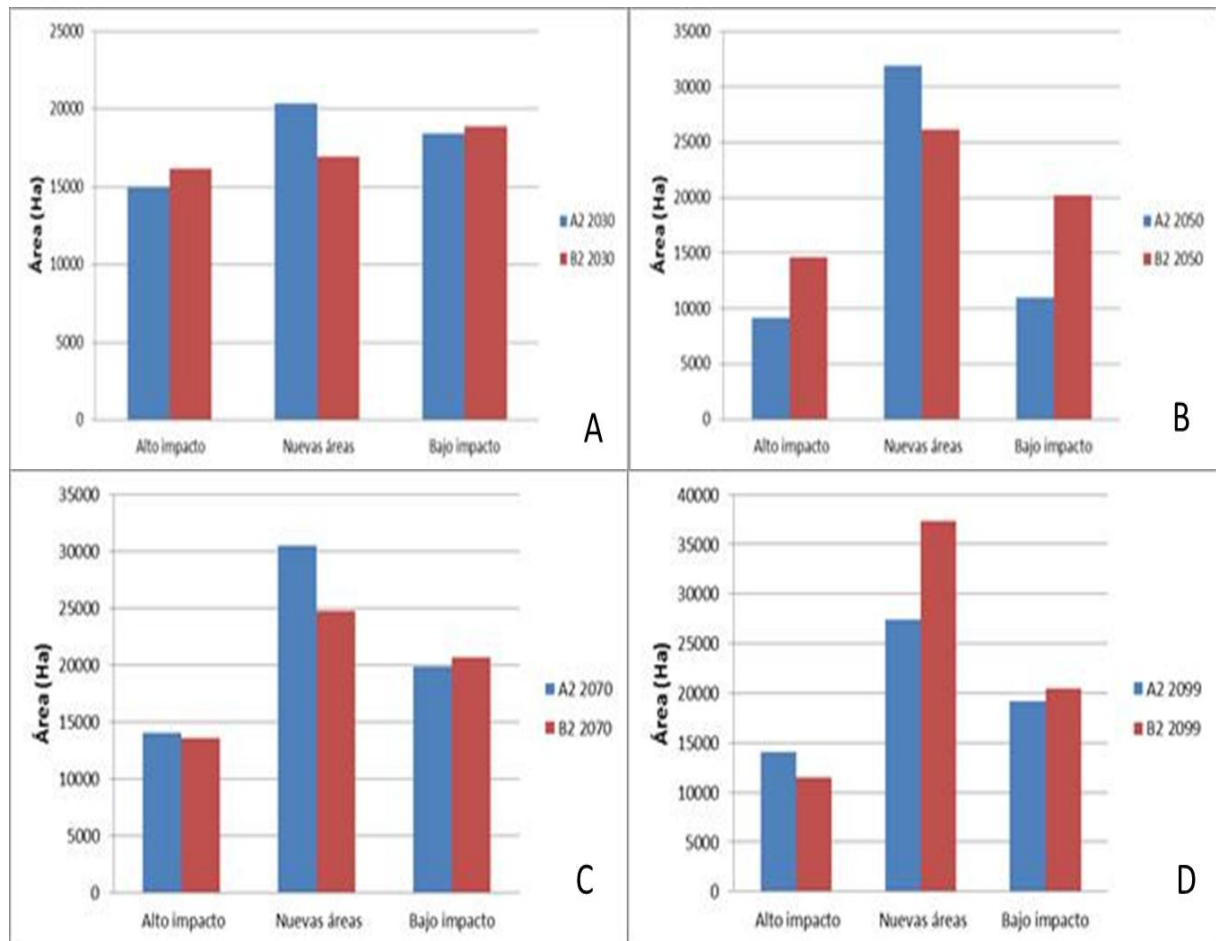


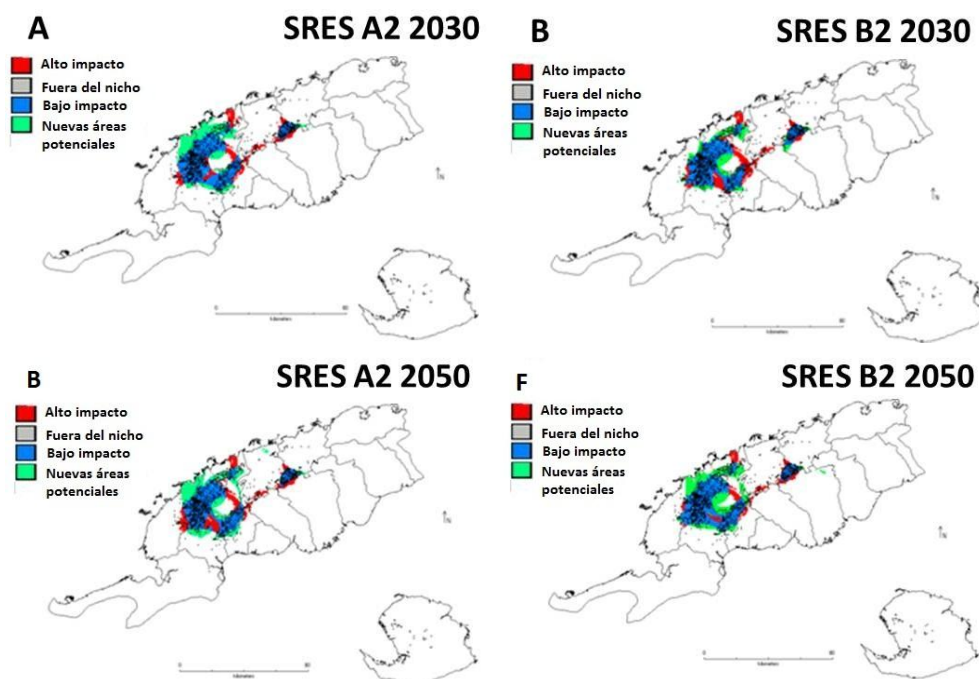
Figura 24. Diferencias en áreas de impactos (hectáreas) proyectadas en *Pinus caribaea* para los escenarios SRES A2 y B2 en los años 2030, 2050, 2070, 2099.

#### 4.3.2.2 Predicción del impacto a *Pinus tropicalis* para los SRES A2 y B2

Las proyecciones de impacto para el SRES A2 (Figura 25A-D), manifiestan el predominio de áreas con bajo impacto, que coinciden con las áreas donde están hoy los rodales en las Alturas de Pizarras del Norte: desde Montezuelo en Mantua hacia el noreste cruzando La Manaja, Cantajorras hasta Malas Aguas en el municipio Minas de Matahambre, esto enfatiza

la necesidad del rescate de las áreas de Mina Dora para la producción de semillas. También en las Alturas de Pizarras del Sur desde Los Portales en Guane al noreste, por todo el Norte de San Juan y Martínez en Santa Damiana hasta Lagunillas, y más noreste en el tramo desde Murguía, San Francisco hasta Juan Brans. Los rodales ubicados en el territorio de la Isla de la Juventud, en el suroeste de la llanura Sur de Pinar del Río, en la llanura norte desde San Cayetano en el municipio Viñales hasta La Palma y aquellos localizados sobre arenas blancas quedarán fuera del nicho climático.

Se predice hasta el 2070 nuevas áreas hacia el norte del municipio Mantua, al Norte y Este del municipio Minas de Matahambre hasta las proximidades de Viñales (Figura 25A, B, C), y en zonas más pequeñas que se extienden al Sur sobre los municipios Guane y San Juan y Martínez, todos en la provincia de Pinar del Río (Figura 25B, C).



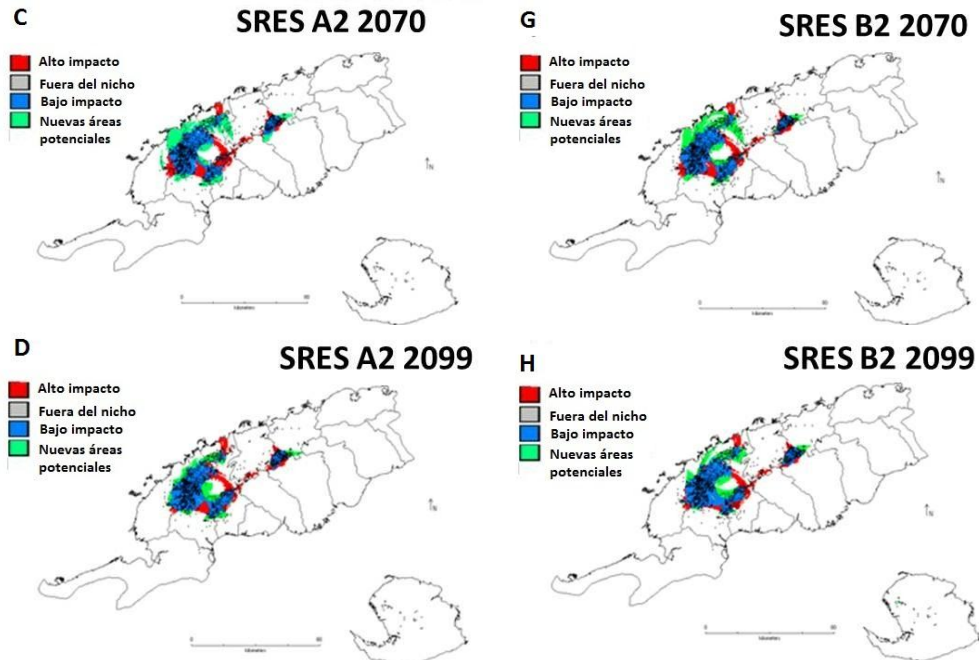


Figura 25. Impacto esperado en los pinares de *Pinus tropicalis* a partir del modelo PRECIS-CARIBE para los escenarios SRES A2 y SRES B2 en el occidente de Cuba

Por su parte, las áreas de alto impacto se localizarán fundamentalmente en la periferia de aquellas con bajo impacto, ubicadas en Montezuelo, Punta de la Sierra en Guane, desde Río Sequito en San Juan y Martínez hacia el noreste por Guanito en el municipio Pinar del Río hasta Los Cayos de San Felipe y Los Jazmines en el municipio Viñales, y desde Cantarote en San Juan y Martínez hacia el Norte por Sumidero hasta Gramales (Figura 25B, C, D), en todos estos lugares hay en la actualidad pequeños y aislados rodales, pues la existencia de la formación de Mogotes limita la distribución de pinares a los valles intramontanos.

El SRES B2 (Figura 25E-H) muestra resultados muy similares a las proyecciones con el SRES A2 para las áreas de bajo y alto impacto. Todos los rodales ubicados en el territorio de la Isla de la Juventud, en el suroeste de la llanura sur de Pinar del Río y en la llanura norte desde San Cayetano en el municipio Viñales hasta La Palma quedan fuera del nicho. Las diferencias

entre las proyecciones SRES A2 y B2 radican en el corto plazo, relacionadas estas con las áreas pronosticadas con alto impacto y nuevas áreas, el resto se mantienen muy similares.

Al comparar los mapas del SRES B2 (Figura 25) y los mapas de aptitud ambiental para la línea base (Figura 11B) muestran, de manera general, que se estima un bajo impacto en aquellas áreas donde existe una aptitud ambiental alta en la actualidad. Sin embargo, alto impacto se predice sobre las áreas que hoy se clasifican con aptitud media más alejadas de las áreas con mayor concentración de rodales naturales de la especie. Entre ellos están aquellos en las Alturas de Pizarras del Sur desde La Capitana, Cayo Palmar hasta Ceja de Francisco en Minas de Matahambre; Antunes en Mantua; entre Punta de la Sierra y Mina Dora, en Guane y en la costa norte entre Malas Aguas y Sitio Morales. El surgimiento de nuevas áreas climáticas potenciales coincide con las áreas con aptitud baja (Figura 11).

Tanto en el SRES A2 como en el SRES B2 (Figura 26), se aprecia que predominan las áreas de bajo impacto para la especie, seguido de la aparición de nuevas áreas potenciales que tienen un comportamiento contradictorio, ya que a mediano plazo muestran un ligero crecimiento para disminuir después al largo plazo, sin embargo estas siempre serán superiores a las pronosticadas como áreas de alto impacto (Figura 27).

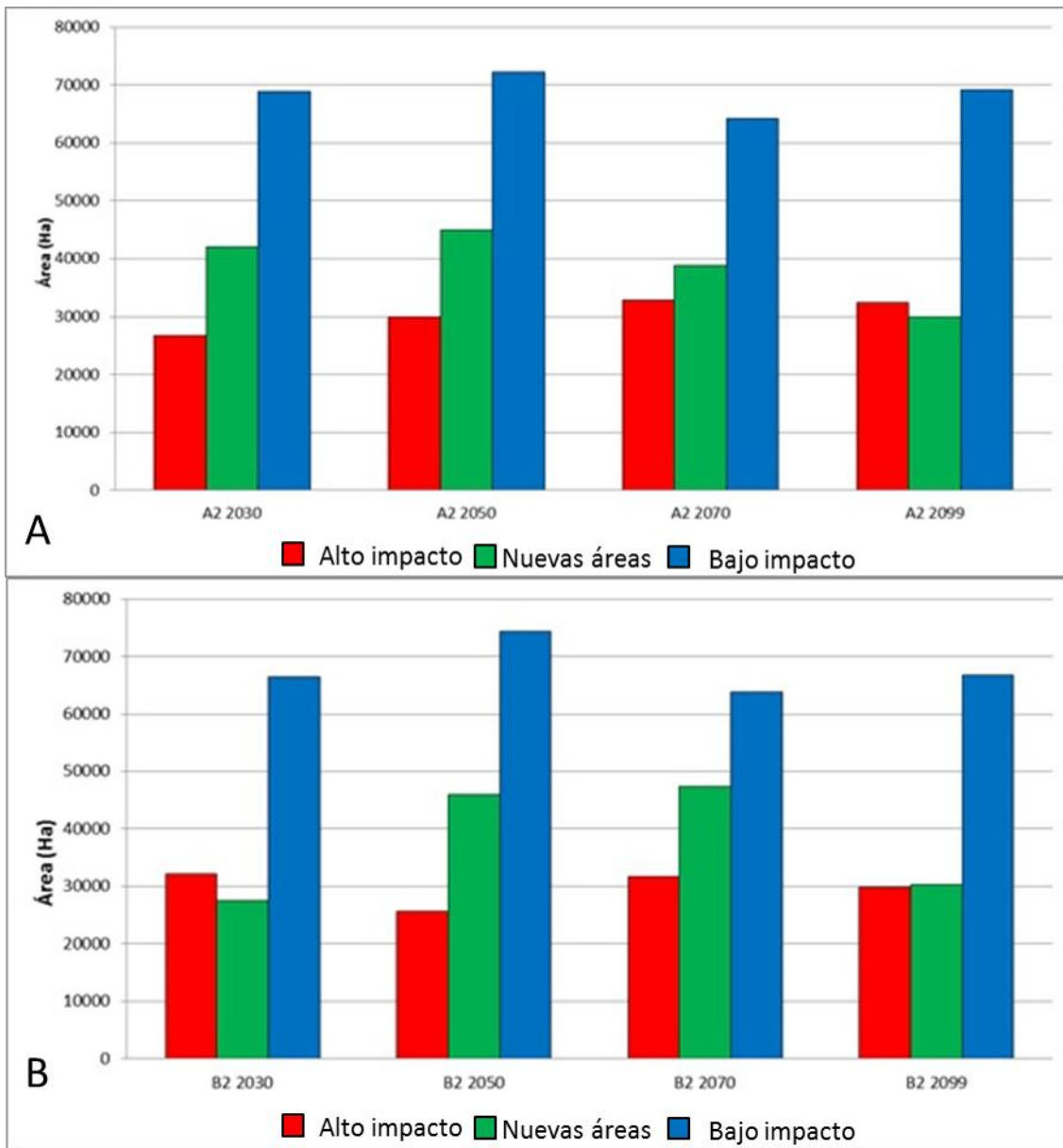


Figura 26. Distribución por áreas de impacto (hectáreas) en *Pinus tropicalis* para los escenarios: A. SRES A2, B. SRES B2

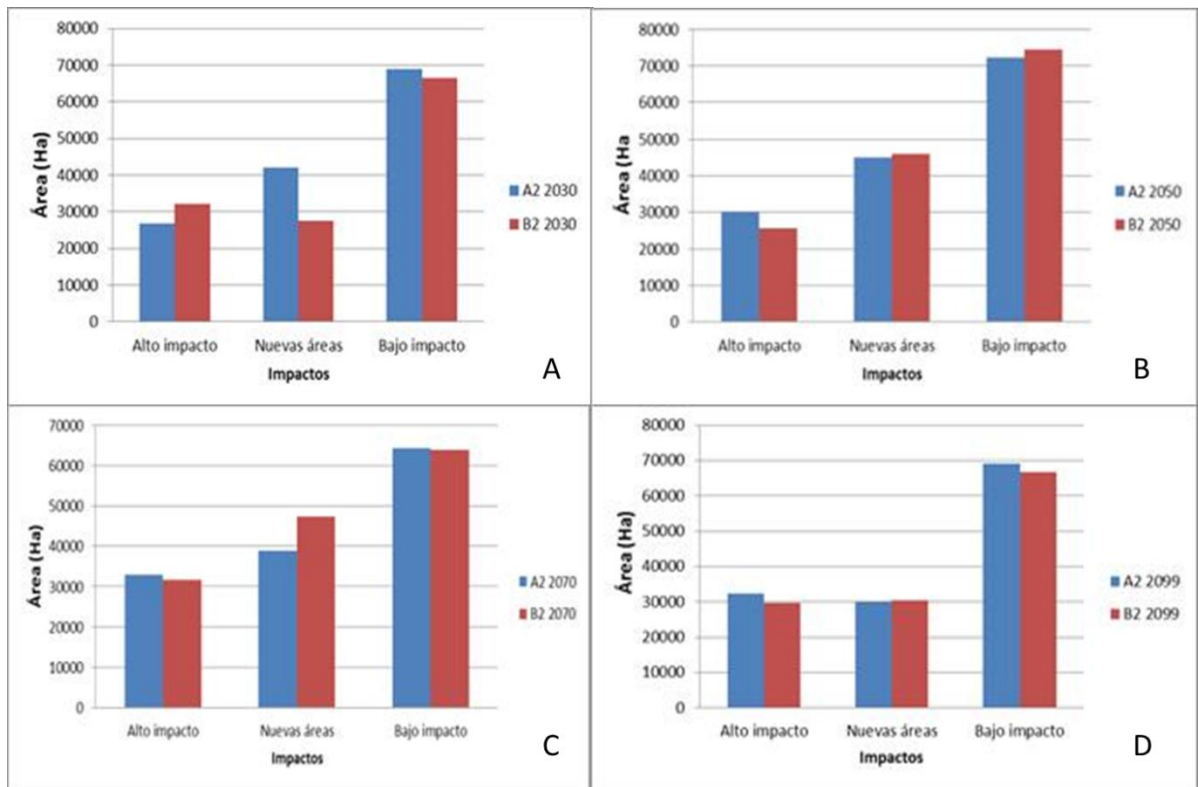


Figura 27. Diferencias en áreas de impactos (hectáreas) proyectadas en *Pinus tropicalis* para los escenarios SRES A2 y B2 en los años 2030, 2050, 2070, 2099.

Como resumen de lo esperado en los impactos del cambio climático a partir de dos escenarios de emisiones (SRES A2 y B2) en los pinares de *Pinus tropicalis* en el occidente de Cuba, se espera un bajo impacto en las áreas más densamente ocupadas, con expansión futura en las Alturas de Pizarras del Norte y del Sur en Pinar del Río. En la Isla de la Juventud y sitios aislados de Pinar del Río se pierde totalmente el nicho climático, y se prevé un alto impacto hacia zonas como Sumidero, Gramales, Los Jazmínez y Cayos de San Felipe, ubicados en el centro de Pinar del Río. Las nuevas áreas climáticas deben surgir con mayor probabilidad para los municipios Minas de Matahambre y Mantua, por lo que significa que a



largo plazo la especie podría presentar un desplazamiento al Oeste. Todo ello, enfatiza la tesis de preferir para plantación y desarrollo forestal al Oeste de Cuba con esta especie.

Concluyendo, conocer las condiciones actuales en las que se distribuyen las especies, brinda información importante para identificar espacialmente las áreas que contienen las características ambientales que estas requieren (Ledig *et al.*, 2010; Koo *et al.*, 2015). Si bien las especies tienen capacidad de cambiar y adaptarse, la presencia de las poblaciones en ciertas condiciones, son un indicador de sus preferencias y requerimientos, y esta es la base del mejor desempeño de un modelo y el algoritmo empleado para la predicción. Esto es importante debido a que las tolerancias entre las especies son distintas y esto hace que algunas sean más vulnerables al cambio climático (*Pinus caribaea versus Pinus tropicalis*).

En el contexto del cambio climático actual, las especies tendrán que enfrentar diversas presiones del ambiente, tales como incrementos en la temperatura, variaciones en los ciclos hidrológicos y responder en tiempos relativamente cortos. Sin embargo, el ritmo de los cambios actuales supera por mucho los patrones del pasado (Thuiller *et al.*, 2009). Debido a esto, la permanencia de las especies ante el cambio climático dependerá de su habilidad de adaptación y de una migración rápida a lugares con condiciones climáticas óptimas (Ledig *et al.*, 2010; Sáenz-Romero, 2014).

Teniendo en cuenta que tanto *Pinus tropicalis* como *Pinus caribaea*, estarán expuestas a cambios rápidos en las condiciones climáticas, que no han experimentado en los últimos miles de años, se espera que sean más vulnerables a los cambios en el clima, lo cual pudiera además incrementarse por su condición de insularidad, endemismo y grado de explotación económica. En efecto, las evaluaciones del efecto del cambio climático son multifacéticas, y

los MDE son solo un inicio (Rehfeldt *et al.*, 2015), en estos deben considerarse todos los aspectos de la vulnerabilidad tales como la exposición, la sensibilidad y la capacidad adaptativa (Glick *et al.*, 2011; Rehfeldt *et al.*, 2015), la variabilidad genética de sus poblaciones y su estructuración (Aitken *et al.*, 2008; Fady *et al.*, 2015).

En el futuro será importante incorporar otras variables como la dispersión de las semillas, dinámica poblacional y aspectos ecofisiológicos para conocer la respuesta de las especies. La capacidad de respuesta depende tanto de factores intrínsecos como la biología y la diversidad genética de las especies, como de factores extrínsecos como la velocidad, magnitud y naturaleza del cambio climático (Gutiérrez y Trejo, 2014).

#### **4.4 Algunas medidas de adaptación ante los efectos del cambio climático en los pinares del occidente de Cuba**

Teniendo en cuenta que los modelos de distribución de especies establecen la influencia de las variables bioclimáticas sobre la distribución geográfica de una especie para generar mapas de idoneidad climática, los resultados son proyectados sobre escenarios de cambio climático con el objetivo de estimar el impacto potencial del calentamiento global sobre la distribución de las especies (Guisan y Thuiller, 2005); Elith y Leathwick, 2009. A pesar de las incertidumbres de estos modelos, que a su vez se ven incrementadas cuando son proyectados sobre escenarios futuros (Araújo *et al.*, 2005), estos constituyen uno de los pocos procedimientos de los que se dispone para anticipar los efectos del cambio climático sobre la distribución de las especies. Estas predicciones son de gran utilidad para adaptar los planes de manejo, conservación y protección al contexto de cambio climático. Identificar regiones no ocupadas en la actualidad por las especies, pero que serían climáticamente

favorables en el futuro y por tanto, podrían actuar como áreas receptoras para estas especies.

Uno de los retos más importante que debe asumir la silvicultura en su proceso de adaptación, lo representa la protección de las fuentes de semilla, por ende del genofondo establecido mediante procesos generalmente muy exhaustivos de selección masal o individual. Por su parte la ordenación debe concentrarse en definir con anticipación la propuesta de áreas donde el clima constituya un factor no limitante para el desarrollo de la masa forestal.

La Figura 28 muestra la localización geográfica actual de las principales Unidades Técnicas derivadas del Programa de Mejoramiento Genético de ambas especies, ubicadas todas en la provincia de Pinar del Río.

Tomando como punto de partida esta información y considerando los resultados sobre la distribución actual y potencial de los pinares en el occidente de Cuba, así como el impacto esperado por el cambio climático en estos sitios, se hace imprescindible identificar su situación actual, la descripción de cuáles serán los impactos del clima pronosticado en estas áreas, y a su vez proponer algunas medidas de adaptación para estos recursos genéticos encaminados a su protección futura.

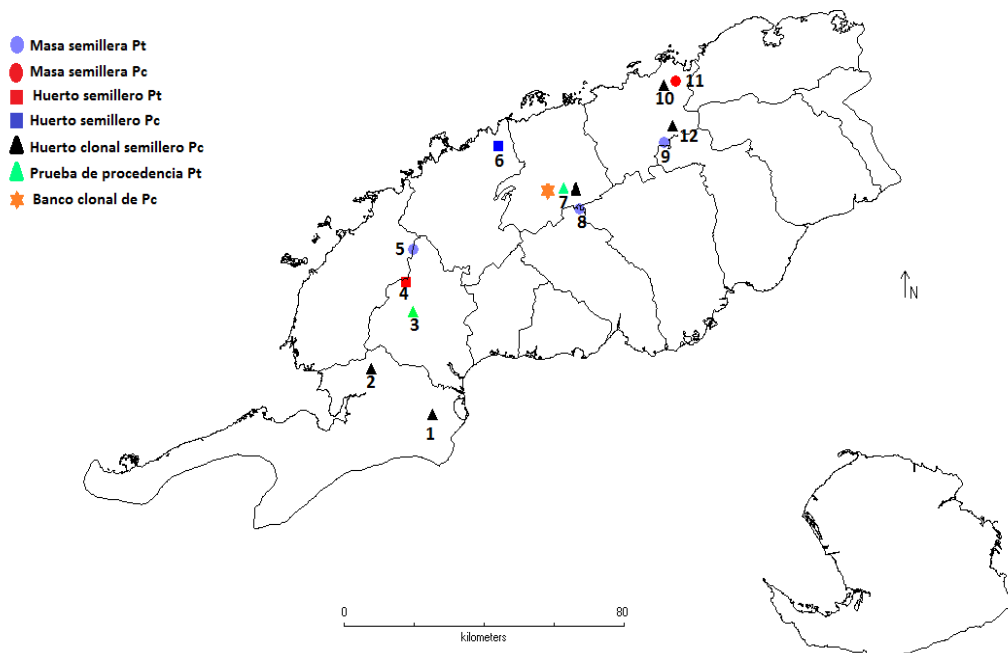


Figura 28. Unidades técnicas de los programas de mejoramiento genético de *P.c* (*Pinus caribaea*); *P.t* (*Pinus tropicalis*): 1-La Grifa; 2-La Pimienta; 3-Cabeza de Horacio; 4-Mina Dora; 5-La Manaja; 6-Malas Aguas; 7-Estación Experimental Viñales; 8-Ceja del Negro; 9-Galalón; 10-Marbajita; 11-Cajálbana; 12-El Caimito

En la actualidad, según los análisis realizados con el modelo de distribución de especies MaxEnt, la masa semillera para *Pinus caribaea* ubicada en Cajálbana, el huerto clonal semillero de *Pinus caribaea* de Marbajita, municipio La Palma, el huerto semillero de *Pinus tropicalis* ubicado en Mina Dora y la masa semillera de *Pinus tropicalis* en La Manaja municipio Mantua, en Pinar del Río, ocupan áreas con condiciones climáticas idóneas, es decir, lugares con aptitud ambiental alta.

La masa semillera de *Pinus tropicalis* ubicada en Ceja del Negro municipio Viñales, y el banco clonal El Caimito de *Pinus caribaea* en el municipio La Palma, están ubicados en áreas que poseen una aptitud ambiental media. Las estimaciones futuras para los SRES A2 y B2

predicen que se esperan pocos cambios en la clasificación de aptitud climática para estas áreas, con excepción del banco clonal El Caimito y las masas semilleras Malas Aguas y Ceja del Negro donde se proyectan cambios en las aptitudes ambientales, las cuales a futuro tendrán aptitud ambiental baja.

En términos de impacto, se espera un bajo impacto del cambio climático en los sitios de Cajálbana, Marbajita, Mina Dora y La Manaja. Respecto a la masa semillera en Ceja del Negro, se aprecian algunas divergencias en los resultados de los modelos, que la ubican en áreas de alto impacto. El resto de las Unidades Técnicas del Programa de Mejoramiento Genético están en la actualidad y se mantendrán en el futuro fuera de las áreas con aptitud ambiental favorable para su desarrollo, en especial Malas Aguas que es un importante huerto clonal.

Al margen de la necesidad de que deben estudiarse detalladamente algunos de los efectos del cambio climático en otras variables que determinen las dinámicas poblacionales, es urgente diseñar acciones o medidas para la adaptación que conduzcan a incrementar la resiliencia y capacidad de adaptación de estas especies frente a los cambios futuros sobre todo a nivel local. Como base de los resultados en este trabajo, se proponen las siguientes medidas de adaptación:

- Proyectar los planes de reforestación al Oeste de Viñales con *Pinus tropicalis* y al Este con *Pinus caribaea*.
- Mantener como unidades de producción de semillas de *Pinus caribaea* a Cajálbana, Marbajita y como unidad de conservación *ex situ* el banco clonal El Caimito en La Palma.

- Asistir la migración del huerto clonal de *Pinus caribaea* de segunda generación en la Estación Experimental Agroforestal Viñales, hacia un área con condiciones climáticas idóneas y predicciones de bajo impacto.
- Relocalizar las fuentes semilleras, resultantes del programa de mejoramiento genético, de *Pinus caribaea* como: Malas Aguas, La Grifa, La Pimienta, y Estación Experimental Agroforestal Viñales hacia zonas donde hayan aptitudes ambientales favorables y que a la vez, se pronostique bajo impacto o nuevas áreas potenciales.
- Mantener como unidades de producción de semillas de *Pinus tropicalis* a corto plazo en Ceja del Negro y Galalón en Pinar del Río.
- Compatibilizar con el Área Protegida de Recursos Manejados “Mil Cumbres” perteneciente a la Empresa Nacional para la Protección de la Flora y la Fauna, y la Empresa Agroforestal de La Palma, la función de masa semillera de Galalón por encontrarse limítrofe al área protegida.
- Asistir para la recuperación del huerto semillero de *Pinus tropicalis* en Mina Dora y su masa semillera La Manaja en el municipio Mantua, al encontrarse en áreas donde no se predicen cambios climáticos.
- En los planes de restauración y reforestación para ecótopos de arenas blancas debe preferirse *Pinus tropicalis*.

## CONCLUSIONES

1. Las variables climáticas que más influyen en la distribución de pinares de *Pinus caribaea* son el régimen anual de precipitaciones, y para *Pinus tropicalis* son la precipitación anual y la temperatura en el período más cálido.
2. La modelación de distribución de especies prevé para *Pinus caribaea* una tendencia a la reducción de sus áreas y ligeros desplazamientos al Este; *Pinus tropicalis* manifiesta un comportamiento al incremento de sus áreas y desplazamiento al Oeste en la isla de Cuba, no así en la Isla de la Juventud.
3. Se prevé mayor impacto sobre los pinares de *Pinus caribaea* y sus unidades técnicas para la producción de semillas que para *Pinus tropicalis*.

## RECOMENDACIONES

### Dirigidas al Ministerio de la Agricultura y el Servicio Estatal Forestal

1. Enfocar los planes de reforestación con pinos hacia áreas con condiciones climáticas favorables sobre la base de las proyecciones de hábitat potenciales futuros.
2. Relocalizar vía migración asistida hacia lugares con condiciones climáticas más favorables a mediano y largo plazo para las unidades técnicas de mejoramiento de *Pinus caribaea* (Malas Aguas, La Grifa, La Pimienta, Estación Experimental Agroforestal Viñales).
3. Planificar las áreas de plantación para ambas especies en áreas de aptitud media a alta y aquellas predichas como nuevas áreas potenciales para 2030 al 2099.
4. Incluir los resultados de las predicciones para la Estrategia Nacional Forestal y la III Comunicación Nacional de Cambio Climático de la República de Cuba.

### Dirigidas al Sistema Nacional de Áreas Protegidas

1. Promover acciones de restauración y conservación *in situ* para *Pinus tropicalis* y *Pinus caribaea*, en función de estos resultados y sus proyecciones, como parte del Programa de gestión de riesgo y cambio climático (SNAP 2014-2020) en los planes de manejo y operativos en las áreas protegidas.
2. Compatibilizar las acciones y atenciones a la masa semillera de Galalón para *Pinus tropicalis* y El Caimito para *Pinus caribaea*, que se encuentra en dentro del APRM Mil Cumbres.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aitken, S., Yeaman, S., Holliday, J., Wang, T., Curtis, S. 2008. Adaptación, migración o extirpación: Impactos del cambio para las poblaciones forestales. *Aplicaciones Evolutivas*, 1:95-111.
- Ajete-Hernández, A., Mercadet-Portillo, A., Álvarez-Brito, A., Fuentes, V., Rodríguez, P. 2006. Mitigación del cambio climático por concepto de fijación de CO<sub>2</sub> en los bosques de la EFI Baracoa, provincia de Guantánamo: segunda aproximación. *Revista Forestal Baracoa*, 25(2):43-50.
- Álvarez-Brito, A., Milián, C., Álvarez, L. 1998. Evaluación a fondo de los posibles impactos del cambio climático sobre los sectores socioeconómicos y ambientales del país. Sector silvícola. *La EFI Guanahacabibes: Un estudio de caso*. Instituto de Investigaciones Forestales, La Habana, Cuba: 347 pp.
- Álvarez-Brito, A., Ponce, D., Mercadet-Portillo, A. 2004. Cambio climático y el sector forestal cubano: segunda aproximación. *Revista Forestal Baracoa (Especial)*:43-49.
- Álvarez-Brito, A., Mercadet-Portillo, A. 2011. El sector forestal cubano y el cambio climático. Instituto de Investigaciones Agroforestales, Ministerio de la Agricultura. La Habana, Cuba. 248 pp.
- Álvarez-Brito, A., Mercadet-Portillo, A. 2014. El sector cubano y el cambio climático. *Revista Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 4(2):1-11.

- Araújo, M., Cabezas, M., Thuiller, W., Hannan, L., Williams, P. 2004. Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve-selection methods. *Global Change Biology*, 10:1618–1626.
- Araújo, M. B., Pearson, R. G., Thuiller, W., Erhard, M. 2005. Validation of species–climate impact models under climate change. *Global Change Biology*, 11:504–513.
- Araújo, M., Guisan, A. 2006. Five (or so) challenges for species distribution modeling. *Journal of Biogeography*, 33:1677–1688.
- Arribas, P., Abellán, P., Velasco, J., Bilton, D.T., Lobo, J. M., Millán, A. y Sánchez, D. 2012. La vulnerabilidad de las especies frente al cambio climático, un reto urgente para la conservación de la biodiversidad. *Ecosistemas*, 21(3):79-84.
- Austin, M. 2007. Species distribution models and ecological theory: a critical assessment and some possible new approaches. *Ecological Modelling*, 200:1-19.
- Ávila-Coria, R., Villavicencio-García, R., Ruiz-Corral, J. A. 2014. Distribución potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el occidente del Estado de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24):92-108.
- Azor-Hernández, L., Barro-Cañamero, A. 2014. Modelación de la distribución potencial de mariposas endémicas cubanas (Lepidoptera: Papilionoidea). *Revista Cubana de Ciencias Biológicas*, 3(3):18-30.
- Ballester-Pérez, M., Gonzáles-Pedroso, C., Pérez-Suárez, R. 2009. Actividad ciclónica en las áreas del Océano Atlántico, Golfo de México, Mar Caribe y Cuba durante el período 1886-2008. Informe final del resultado 415.512. Instituto de Meteorología, CITMA. 88 pp.

- Barve, N., Barve, V., Jiménez-Valverde, A., Lira-Noriega, A., Maher, S. P., Townsend, A. P., Soberón, J., Villalobos, F. 2011. The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling*, 222:1810-1819.
- Beamont, L., Hughes, L., Poulsen, M. 2005. Predicting species distributions: use of climatic parameters in BIOCLIM and its impact on predictions of species current and future distributions. *Ecological Modelling*, 186:250–269.
- Benito-Garzón, M. 2006. El efecto del cambio climático sobre las distribuciones de los bosques ibéricos: pasado, presente y futuro. Tesis doctoral. Departamento de Biología. Universidad Autónoma de Madrid. 195 pp.
- Betancourt, A. 1987. *Silvicultura especial de árboles maderables tropicales*. Edición Científico-Técnica, Habana, Cuba. 456 pp.
- Borhidi, A., Muñiz, O. 1980. Die vegetationskarte von Kuba. *Acta Bot. Acad. Sci. Hungaricae*, 26(1-2):25-53.
- Broennimann, O., Thuiller, W., Hughes, G., Midgley, G. F., Alkemade, J. M. R., Guisan, A. 2006. Do geographic distribution, niche property and life form explain plants vulnerability to global change? *Global Change Biology*, 12:1079-1093.
- Busby, J. 1991. BIOCLIM: a bioclimate analysis and prediction system. In Margules, C.R. y Austin, M.P. Eds. *Nature conservation: cost effective biological surveys and data analysis*. 64–68. CSIRO, Melbourne.

- Camero-Rubio, E., Lobo, J. M. 2010. Distribución conocida y potencial de las especies del género *Eurysternus* Dalman, Coleoptera: Scarabaeidae de Colombia. Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa, 47:257–264.
- Campbell, J., Taylor, M., Stephenson, T., Watson, R., Whyte, F. 2010. Future climate of the Caribbean from a regional climate model. International Journal of Climatology. DOI: 10.1002/joc.2200.
- Carpenter, G., Gillison, A., Winter, J. 1993. DOMAIN: a flexible modeling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. Biodiversity Conservation, 2:667-680.
- Cayuela, L., Golicher, D., Newton, A., Kolb, M., De Albuquerque, F., Arets, E. 2009. Species distribution modeling in the tropics: problems, potentialities, and the role of biological data for effective species conservation. Tropical Conservation Science, 2:319–352.
- Centella-Artola, A., Naranjo-Díaz, L., Paz-Castro, L., Cárdenas, P., Lapinel-Pedroso, B., Ballester-Pérez, M., Pérez-Suárez, R., Alfonso-Y Fernández, A., González, C., Limia-Martínez, M., Sosa, M. 1997. Variaciones y cambios del clima en Cuba. Informe Técnico. Centro Nacional del Clima, Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba. 58 pp.
- Centella-Artola, A., Llanes-Regueiro, J., Paz-Castro, L., López, C., Limia-Martínez, M. 2001. Primera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, República de Cuba. Instituto de Meteorología-CUBAENERGIA, La Habana. 166 pp.

- Centella-Artola, A., Bezanilla-Morlot, A., Leslie, A. 2008. A study of the uncertainty in future Caribbean climate using the PRECIS Regional Climate Model. Technical Report Community Caribbean Climate Center, Belmopan, 16 pp.
- Cobos-Cobos, M. E. 2016. Posibles implicaciones del cambio climático sobre la distribución de las especies del género *Peltophryne* (Anura: Bufonidae) en Cuba. Tesis de Maestría. Facultad de Biología. Universidad de la Habana. <http://www.scriptorium.uh.cu/xmlui/handle/123456789/3266>
- Contreras-Medina, R., Luna-Vega, I., Ríos-Muñoz, C. 2010. Distribución de *Taxus globosa* Taxaceae en México: Modelos ecológicos de nicho, efectos del cambio del uso de suelo y conservación. *Revista Chilena de Historia Natural*, 83:421-433.
- Crutzen, P., Stoermer, E. F. 2000. The "Anthropocene". *Global Change Newsletter*, 41:17–18.
- Cutié-Cancino, V., Lapinel-Pedroso, B., Gonzáles-Rodríguez, N., Perdigón-Morales, J., Fonseca-Rivera, C., Gonzáles-García, I. 2013. La sequía en Cuba, un texto de referencia. Monografía. Proyecto 1/OP-15/GEF. Instituto de Meteorología. 358 pp.
- Davis, M. B., Shaw, R.G., Etterson, J. R. 2005. Evolutionary responses to changing climate. *Ecology*, 86:1704–1714.
- Del Risco-Rodríguez, E., Reyes-Domínguez, O. Pinares de Cuba. (Inédito).
- Del Risco-Rodríguez, E., Samek, V. 1995. Los bosques de Cuba: historia y características. Editorial Científico- Técnica. La Habana. 94 pp
- ECLAC, 2010. Regional climate modeling in the Caribbean. Economic Commission for Latin America and the Caribbean Subregional Headquarters for the Caribbean.

- Elith, J., Graham, C., Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmas, R., Huettmann, F., Leathwick, J., Lehman, A. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29:129-151.
- Elith, J. y Leathwick, J. 2009. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 40:677-697.
- Elith, J., Phillips, S., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y., Yates, C. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17:43–57.
- Escobar, L., Lira, A., Medina, G., Townsend, A. 2014. Potential for spread of the white-nose fungus *Pseudogymnoascus destructans* in the Americas: use of Maxent and NicheA to assure strict model transference. *Geospatial Health*, 91:221-229.
- Fady, B., Cottrell, J., Ackzell, L., Alía, R., Muys, B., Prada, A., González-Martínez, S. C. 2015. Forests and global change: what can genetics contribute to the major forest management and policy challenges of the twenty-first century? *Regional Environmental Change*. DOI 10.1007/s10113-015-0843-9.
- Farjon, A., Styles, B. T. 1997: *Pinus* Flora Neotropica Monograph 70, New York Botanical Garden, NY.
- Fernández, A., Sánchez, R., Gil, P., Manrique, E., Fernández, R., Navarro, R. 2012. Efectos del cambio climático sobre la distribución de los alcornoques españoles. Una aproximación fitoclimática para la futura gestión. *Ecosistemas*, 21:50-62.
- Ferrer-Sánchez, Y., Rodríguez-Estrella, R. 2016. How rare species conservation management can be strengthened with use of ecological niche modeling: The case for

endangered endemic Gundlach's Hawk and Cuban Black Hawk. *Global Ecology and Conservation*, 5:88-99.

Ferrier, S. 2002. Mapping spatial pattern in biodiversity for regional conservation planning: where to from letter? *Systematic Biology*, 51:331-363.

Figueroa-Sierra, C. 2002. Ecología y conservación de *Pinus tropicalis* en bosques naturales de las Alturas de Pizarras. Tesis doctoral. Dpto. Forestal Universidad Pinar del Río. 124 pp.

Fong-Grillo, A. 2009. Distribución y conservación de los anfibios de los macizos montañosos de la región oriental de Cuba. Tesis doctoral. Universidad de Alicante y Universidad de Pinar del Río. 241 pp.

Francis, J. K. 1992. *Pinus caribaea* Morelet. Caribbean pine. SO-ITF-SM-53. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 397-403.

Franklin, J. 2009. Mapping Species Distributions. Spatial Inference and Prediction. Cambridge University Press, Cambridge.

Gaikwad, J., Wilson, P., Ranganathan, S. 2011. Ecological niche modeling of customary medicinal plant species used by Australian Aborigines to identify species-rich and culturally valuable areas for conservation. *Ecological Modelling*, 222:3437–3443.

Gómez, R. 2011. Guía para la elaboración de mapas de distribución potencial. Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Veracruz.

- García-Aranda, M.A., Cantú-Ayala, C., Estrada-Castillón, E., Pando-Moreno, M., Moreno-Talamantes, A. 2012 Distribución actual y potencial de *Taxus globosa* Taxaceae en México. Journal of the Botanical Research Institute of Texas 6:587–598.
- García-Morales, M. 2008. Modelos predictivos de riqueza de diversidad vegetal. Comparación y optimización de métodos de modelado ecológico. Memoria de Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Biológicas. Departamento de Biología Vegetal I. Madrid, España. 188 p.
- García-Roselló, E., Guisande, C., Manjarrés-Hernández, A., González-Dacosta, J., Heine, J., Pelayo-Villamil, P., González-Vilas, I., Vari, R., Vaamonde, A., Granado-Lorencio, C., Lobo, J. 2014. Can we derive macroecological patterns from primary Global Biodiversity Information Facility data? Global Ecology and Biogeography, DOI: 10.1111/geb.12260
- Geadá-López, G., Kamiya, K. Harada, K. 2002. Phylogenetic relationships of *Diploxylon* pines (subgenus *Pinus*) based on plastid sequence data. International Journal of Plant Science, 163(5):737-747.
- Geadá-López, G. 2003. Phylogenetic Relationships of *Diploxylon* Pines and Genetic Variation of *Pinus tropicalis*. (En Inglés). DOI: 10.13140/RG.2.2.34316.72325. Disponible en: <http://id.ndl.go.jp/bib/000007521329/eng>.
- Geadá-López, G.; Kamiya, K.; Harada, K. 2004. Phylogeny of *Diploxylon* pines (subgenus *Pinus*). Forest Genetics, 11(3-4):213-221.
- Geadá-López, G., Miranda-Sierra, C. A. 2016. Predicción de hábitats potenciales y futuros de pinares de *Pinus tropicalis* Morelet en el occidente de Cuba bajo diferentes



escenarios de cambio climático. Revista Forestal Baracoa vol. 35, Número Especial 2016: 1-8 pp.

Gernandt, D. S.; Geada-López, G.; Ortiz, S.; Liston, A. 2005. Phylogeny and Classification of *Pinus*. *Taxon*, 54(1):29-42.

Gernandt, D. S., Magallon S. A.; Geada-López, G. Zeron, O. Willyard, A. Liston A. 2008. Use of simultaneous analyses to guide fossil-based calibration of Pinaceae phylogeny. *International Journal of Plant Science*, 169(8):1086-1099.

Glick, P., Stein, B. A., Edelson, N. A. 2011. Scanning the conservation horizon: A guide to climate change vulnerability assessment. National Wildlife Federation, Washington, D. C. 168 p.

Gómez-Díaz, J. D., Monterroso-Rivás, A. I., Tinoco-Rueda, J. A. 2007. Distribución del cedro rojo *Cedrela odorata* L. en el estado de Hidalgo, bajo condiciones actuales y escenarios de cambio climático. *Madera y Bosques*, 132:29-49.

González-Irusta, J.M., González-Porto, M., Sarralde, R., Arrese, B., Almón, B., Martín-Sosa, P. 2014. Comparing species distribution models: a case study of four deep sea urchin species. *Hydrobiología*, DOI 10.1007/s10750-014-2090-3.

Graham, C. 2004. Integrating phylogenetics and environmental niche models to explore specification mechanism in dendrobatid frogs. *Evolution*, 58:1781-1793.

Graham, C., Moritz, C. and Williams, S. 2006. Habitat history improves prediction of biodiversity in a rainforest fauna. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 103:632-636.

- Gray, L., Hamann, A. 2012. Tracking suitable habitat for tree populations under climate change in western North America. *Climate Change*, DOI 10:1007/s10584-012-0548-8.
- Grinnell, J. 1917. Field tests of theories concerning distributional control. *American Naturalist*, 51:115-128.
- Guillera, G., Lahoz, J., Elith, J., Kujala, H., Lentini, P., McCarthy, M., Tingley, R., Wintle, B. 2015. Is my species distribution model fit for purpose? Matching data and models to applications.
- Guisan, A., Thuiller, W. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8:993-1009.
- Guisan, A., Tingley, R., Baumgartner, B., Naujokaitis, I., Sutcliffe, P., Tulloch, A., Regan, T., Brotons, T., McDonald, E., Mantyka, C., Martin, T., Rhodes, J., Maggini, R., Setterfield, S., Elith, J., Schwartz, M., Wintle, B., Broennimann, O., Austin, M., Ferrier, S., Kearney, R., Possingham, H., Buckley, Y. 2013. Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecology Letters*, 16:1424–1435.
- Gutiérrez, E., Trejo I. 2014. Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85:179-188.
- Gutiérrez-Pérez, T., Centella-Artola, A., Limia-Martínez, M., López, M. 2000. Impactos del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba. Informe Técnico. 207 pp.
- Hambrey, M., Harland, W. 1981. Earth's pre-Pleistocene glacial record. Cambridge University Press. 1004 pp.

- Hansen, A., Neilson, R., Dale, V., Flater, C., Iverson, L., Currie, D., Shafer, S., Cok, R., Bartlein, P. 2001. Global Change in Forests: Response of Species, Communities and Biomes. *BioScience*, 51:765–779.
- He, T., Pausas, J. G., Belcher, C. M., Schwilk, D. W., Lamont, B. B. 2012. Fire-adapted traits of *Pinus* arose in the fiery Cretaceous. *New Phytologist*, 194:751-759.
- Hechavarría-Kindelán, O., Álvarez-Brito, A., Montalvo, J. M. 2008. Respuesta fenológica de *Juglans jamaicensis subsp. Jamaicensis* al aumento de la temperatura en bosque pluvial montano. *Revista Forestal Baracoa*, 27(2):81-89.
- Hechavarría-Kindelán, O. 2009. Contribución de la fenología a la conservación de tres especies forestales en Topes de Collantes. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Forestales, Departamento Forestal, Facultad Forestal-Agronomía, Universidad Pinar del Río: 117 pp.
- Hechavarría-Kindelán, O. 2012. Alteraciones en la época de recolección de frutos de especies forestales por aumento de la temperatura en zonas montañosas de Topes de Collantes. *Revista Forestal Baracoa*, 31(1):73-78.
- Hijmans, R., Guarino, L., Bussink, C., Mathur, P., Cruz, M., Barrantes, I., Rojas, E. 2004. Sistema de Información Geográfica para el Análisis de Datos de la Distribución de Especies (DIVA-GIS). Universidad de California. USA.
- Howard, A., Bernardes, S., Nibbelink, N., Biondi, L., Presotto, A., Fragaszy, D., Madden, M. 2012. A maximum entropy model of the bearded capuchin monkey habitat incorporating topography and spectral unmixing analysis. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1-2:7-11.

- INSMET (Instituto de Meteorología). 2010. Base de datos del sistema PRECIS-CARIBE para Cuba. Centro de física de la atmósfera.
- IPCC. 2001. Special Report on Emission Scenarios. IPCC WGIII. 35 pp.
- IPCC. 2002. Cambio climático y diversidad biológica. Ed. H. Gitay, A. Suárez, R.T. Watson y D.J. Dokken Reporte Técnico V del IPCC, 85 pp.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 992 pp.
- IPCC. 2007a. Cambio climático: Base de las Ciencias Físicas. Resumen para responsables de políticas. Parte de la contribución del Grupo de Trabajo I al *Cuarto Informe de Evaluación del IPCC*, Ginebra. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)
- IPCC. 2007b. 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, Ginebra: 104 pp.
- IPCC. 2014. Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, 32 pp.
- Islam S., Rehman N., Sheikh M. M. 2009. Future change in the frequency of warm and cold spells durations over Pakistan simulated by the PRECIS regional climate model. *Climate Change*, 94:35–45.

- Janowiak, M. K., Swanston, C. W., Nagel, L. M., Brandt, L. A., Butler, P. R., Handler, S. D. *et al.* 2014. A practical approach for translating climate change adaptation principles into forest management actions. *Journal Forestry*, 112:424-433.
- Jones, R., Noger, M., Hassell, D. C., Hudson, D., Wilson, S., Jenkins, G., Mitchell, J. 2004. Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. Met Office Hadley Center, Exeter, UK. 40 pp.
- Joyce, D., Rehfeldt, G. 2013. Climatic niche, ecological genetics, and impact of climate change on eastern white pine *Pinus strobus* L.: Guidelines for land managers. *Forest Ecology and Management*, 295:173–192.
- Jury, M. R. 2009. A quasi-decadal cycle in Caribbean climate. *Journal of Geophysical Research*, DOI:10.1029/2009JD011741.
- Karmalkar, A., Taylor, M., Campbell J., Stephenson, T., New, M., Centella-Artola, A., Bezanilla-Morlot, A. 2013. A review of observed and projected changes in climate for the islands in the Caribbean. *Atmósfera*, 26(2):283-309.
- Keeley, J. E. 2012. Ecology and evolution of pine life histories. *Annals of Forestry Sciences*, DOI:10.1007/s13595-012-0201-8.
- Koo, K., Patten, B., Madden, M. 2015. Predicting effects of climate change on habitat suitability of Red Spruce (*Picea rubens* Sarg.) in the Southern Appalachian Mountains of the USA: understanding complex systems mechanisms through modeling. *Forest*, 6:1208-1226.

- Kotroni, V., Lykoudis, S., Lagouvardos, K., Lalas, D. 2008. A fine resolution regional climate change experiment for the Eastern Mediterranean: Analysis of the present climate simulations. *Global and Planetary Change*, 64(1–2):93–104.
- Kukla, G. (2005). Saalian supercycle, Mindel/Riss interglacial and Milankovitch's dating. *Quaternary Science Reviews* 24 (14-15):1573–83.
- Kumar, S., Stohlgren, T. 2009. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and Natural Environment*, 14:94-98.
- Lapinel-Pedroso, B., Centella-Astor, A, Fonseca-Rivera, C., Cutié-Cancino, V., Báez, R. 2006. Predicción a largo plazo de la sequía agrícola y evaluación científica de los riesgos asociados a la ocurrencia de la sequía meteorológica y agrícola en Cuba. PRCT 4072: Análisis y pronóstico del tiempo y el clima y sus implicaciones socio económicas. Parte I: Sequía Meteorológica. 100 pp.
- Lapinel-Pedroso, B., Rivero-Vega, R., Cutié-Cancino, V. 1993. La sequía en Cuba: análisis del período 1931-1990. Informe científico-técnico. Centro meteorológico territorial, Camagüey, 40 pp.
- Latif, Q., Saab, V., Mclean, K., Dudley, J. 2014. Evaluating Habitat Suitability Models for Nesting White-Headed Woodpeckers in Unburned Forest. *The Journal of Wildlife Management*, DOI: 10.1002/jwmg.842.
- Leal-Nares, O., Mendoza, M., Pérez-Salicrup, D., Geneletti, D., López-Granado, E., Carranza, E. 2012. Distribución potencial del *Pinus martinezii*: un modelo espacial

- basado en conocimiento ecológico y análisis multicriterio. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83:1152-1170.
- Ledig, F., Rehfeldt, G., Sáenz-Romero, C., Flores-López, C. 2010. Projections of suitable habitat for rare species under global warming scenarios. *American Journal of Botany*, 97(6):970–987.
- López-Almirall, A. 1982. Variabilidad del género *Pinus* (Coniferales: Pinaceae) en Cuba. *Acta Botánica Cubana*, 12:1-32.
- Marengo, J. A., Jones, R., Alves, L. M., Valverde, M. C. 2009. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.1863.
- Matyás, C., Berki, I., Czúcz, B., Gálós, B., Móricz, N. and Rasztovits, E. 2010. Future of beech in Southeast Europe from the perspective of evolutionary ecology. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 6:91–110.
- Mendoza-Maya, E., Espino-Espino, J., Quiñones-Pérez, C., Flores-López, C., Wehenkel, C., Vargas-Hernández, J., Sáenz-Romero, C. 2015. Propuesta de conservación de tres especies mexicanas de *Picea* en peligro de extinción. *Revista Fitotécnica Mexicana*, 38(3):235–247.
- Mercadet-Portillo, A., Álvarez-Brito, A. 2006. Certificación del carbono retenido por las empresas forestales y bases para su reconocimiento ambiental. *Revista Forestal Baracoa*, 25(1):65-71.

- Merow, C., Smith, M., Silander, J. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species distributions: what it does, and why inputs and setting matter. *Ecography*, 36:1058-1069.
- Miranda-Sierra, C., Geada-López. G., Sotolongo-Sospedra, R. 2016. Modelación de la distribución potencial de *Pinus tropicalis* en el occidente de Cuba. *Revista Avances*, 18(1).28-35.
- Miranda-Sierra, C., Geada-López. G., Sotolongo-Sospedra, R. 2017. Modelación de hábitats potenciales de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barrett y Golfari en el occidente de Cuba. *Revista Avances*, 19(1).
- Morales, N. 2012. Modelos de distribución de especies: Software Maxent y sus aplicaciones en conservación. *Revista de Conservación Ambiental*, 2(1):1-5.
- Moreno, R., Zamora, R., Molina, J., Vásquez, A., Herrera, M. 2011. Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in south Chilean temperate forest using maximum entropy MaxEnt. *Ecological Informatics*, 6:367-370.
- Moritz, C., Agudo, R. 2013. The future of species under climate change: Resilience or Decline? *Science*, 341:504-508.
- Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J. F., Manning, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., Nakicenovic, N., O'Neill, B., Pichs, R., Riahi, K., Rose, S., Runci, P., Stouffer, R., Detlef, van V., Weyant, J., Wilbanks, T., van Ypersele, J.P., and Zurek, M. 2008. Towards new scenarios for analysis of emissions,



- climate change, impacts and response strategies. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 132 p.
- Nakicenovic, N., Swart, R. 2000. Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA; 599.
- Naranjo-Díaz, L., Centella-Artola, A. 1997. Variaciones Interanuales de los campos meteorológicos en el Mar Caribe y el Golfo de México. 1ra Parte: Presión a nivel del Mar y alturas en 500 hPa. Instituto de Meteorología, 52 pp.
- Nix, H. 1986. BIOCLIM, a bioclimatic analysis and prediction system. CSIRO Division Water and Land Resources Research Annual Report. CSIRO Publishing, Canberra, Australia
- OMM. 2013. El estado del clima mundial 2001– 2010. Un decenio de fenómenos climáticos extremos. Informe resumido. Organización Meteorológica Mundial, OMM- N° 1119, 15 p.
- OMM. 1966. Vocabulario Meteorológico Internacional. Organización Meteorológica Mundial, OMM- N°. 182, 398 p.
- Ortiz-Álvarez, O. 2010. El sector forestal de la península de Zapata, en Matanzas, Cuba: Aspectos de su interrelación con el cambio climático. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Ecológicas, Universidad de Alicante, España; Universidad de Pinar del Río, Cuba, 264 pp.
- Pearson, R. G. 2007. Species distribution modeling for conservation educators and practitioners. Synthesis American Museum of Natural History. Disponible en <http://ncep.amhn.org>.

- Pérez-Suárez, R., Fonseca-Rivera, C., Lapinel-Pedroso, B., González-Pedroso, C., Planos-Gutiérrez, E., Cutié-Cancino, V., Ballester-Pérez, Limia-Martínez, M., Vega, R. 2011. "Segunda evaluación de las Variaciones y tendencias del clima de Cuba", en II Congreso Internacional de Cambio Climático de la VIII Convención Internacional de Medioambiente y Desarrollo. ISBN 978-959-300-018-5.
- Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martinez-Meyer, E., Nakamura, M. 2011. Ecological niches and geographic distributions. Princeton University Press, Princeton, USA.
- Peterson, A.T., Shaw, J. 2003. Lutzomya vectors for cutaneous leishmaniasis in southern Brazil: ecological niche models, predicted geographic distribution, and climate change effects. *Institute J. Parasitology*. 33:919-931.
- Phillips, S. J., Dudik, M., Schapire, R. E. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. En: *Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on Machine Learning*, Banff, Canada, 655-662 pp.
- Phillips, S. J. 2005. A brief tutorial on MaxEnt. *Rev. AT&T Research*, Princeton University, 12 pp. [<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/tutorial/>].
- Phillips, S. J., Dudik, M., Schapire, R. E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190:231-259.
- Phillips, S, Dudik, M. 2010. Una breve guía didáctica sobre MaxEnt. AT&T, Princeton University y el Centro para la Biodiversidad y Conservación del Museo Americano de Historia Natural. <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/tutorial/tutorial-in-spanish.doc>. 20-de mayo de 2010.

- Planos- Gutiérrez, E., Rivero-Vega, R., Guevara-Velazco, A. V. 2013. Impacto del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba. Instituto de Meteorología, Agencia de Medio Ambiente, Ministerio de Ciencia, Medio Ambiente y Tecnología. La Habana, Cuba, 430 pp.
- Porfirio, L. L., Harris, R. B, Lefroy, E. C., Hugh, S.; Gould, S. F.; Lee, G., Bindoff, N. L.; Mackey, B. 2014. Improving the use of species distribution models in conservation planning and management under climate change. PLOS ONE, DOI: 10.1371/journal.pone.0113749
- Puliam, H. R. 2000. On the relationship between niche and distribution. Ecology Letters, 3: 349-361.
- Ramírez-Herrera, C., Vargas-Hernández, J., López-Upton, J. 2005. Distribución y conservación de las poblaciones naturales de *Pinus greggii*. Acta Botánica Mexicana, 72:1-16.
- Ramírez-Ojeda, G., Ruiz-Corral, J., Pérez-Mendoza, C., Villavicencio-García, R., Mena-Munguía, S., Durán-Puga, N. 2014. Impact of climate change on the geographic distribution of *Gossypium hirsutum* L. in Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas (Especial), 10:1885-1895.
- Rehfeldt, G. E., Wilson, B.C., Wells, S.P. and Jeffers, R.M. 1996. Phylogeographic, taxonomic, and genetic implications of phenotypic variation in the Ponderosae of the Southwest. Southwest Nature, 41:409–418.
- Rehfeldt, G. E., Wykoff, W. R., Ying, C. 2001. Physiologic plasticity, evolution, and impacts of a changing climate on *Pinus contorta*. Climatic Change, 50:355–376.

- Rehfeldt, G. E., Tchebakova, N., Parfenova, Y., Wykoff, W., Kuzmina, N., Milyutin, L. 2002. Intraspecific responses to climate in *Pinus sylvestris*. *Global Change Biology*, 8:912–929.
- Rehfeldt, G. E., Worrall, J., Marchetti, S., Crookston, N. 2015. Adapting forest management to climate change using bioclimate models with topographic drivers. *Forestry*, 88:528–539.
- Rieu, R. 2007. Climatic cycles during a Neoproterozoic "snowball" glacial epoch. *Geology*, 35(4):299–302.
- República de Cuba, 2015: Segunda Comunicación Nacional de Cuba a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, 228 pp.
- Rivas-Martínez, S., Rivas-Sáenz, S., Penas, M. 2011. Worldwide Bioclimatic Classification System. *Global Geobotany*, 1:1-634.
- Ruiz-Corral, J. A., Sánchez-González, J. J., Ramírez-Ojeda, G., Ramírez-Díaz, J. L., Durán-Puga, N., De la Cruz-Larios, L., Medina-García, G., Rodríguez-Moreno, V., Zarazúa-Villaseñor, P. 2014. Cambio climático en México y distribución potencial del grupo racial de maíz cónico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, (Especial)* 10:1871-1883.
- Sáenz-Romero, C., Guzmán-Reyna, R., Rehfeldt, G. 2006. Altitudinal genetic variation among *Pinus oocarpa* populations in Michoacán, Mexico. Implications for seed zoning, conservation, tree breeding and global warning. *Forest Ecology and Management*, 229:340-350.

- Sáenz-Romero, C, Ruiz-Talonia, L., Beaulieu, J., Sánchez-Vargas, N., Rehfeldt, G. 2011. Genetic variation among *Pinus patula* populations along an altitudinal gradient. Two environment nursery tests. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 34(1):19–25.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Duval, P., Lindig-Cisneros, R. A. 2012a. *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 275: 98-106.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G., Soto-Correa, J., Aguilar-Aguilar, S., Zamarripa-Morales, V., López-Upton, J. 2012b. Altitudinal genetic variation among *Pinus pseudostrobus* populations from Michoacán, México. Two location shadehouse test results. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 35(2):111–120.
- Sáenz-Romero, C. 2014. Guía técnica para la planeación de la reforestación adaptada al cambio climático. CONAFOR. Primera edición. 72 p.
- Samek, V., Del Risco-Rodríguez, E. 1989. Los pinares de la provincia de Pinar del Río, Cuba. Estudio sinecológico. Editorial. Academia. La Habana. 60 p.
- Samek, V., Travieso, A. 1968. Climarregiones de Cuba. *Revolución Agraria*, 2(1):5-23.
- Scheldeman, X., Zonneveld, M. 2011. Manual de capacitación en Análisis Espacial de Diversidad y Distribución de Plantas. Bioersivity International, Roma, Italia, 186 pp.
- Schmidt, G., Shindel, D., Harder, S. 2004. A note on the relationship between ice core methane concentrations and insolation. *Geophysical Research Letters*, 31(23):23-206.
- Scholes, R., Settele, J., Betts, R., Bunn, S., Leadley, P., Nepstad, D. 2014. Terrestrial and inland water systems. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*.

- The Final Draft Report of the Working Group II contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change, 153 pp.
- Silva, L., Schaefer, H., Sardos, J. 2015. AOB PLANTS. Towards a more holistic research approach to plant conservation: the case of rare plant on oceanic islands. DOI: 10.1093/aobpla/plv066.
- Smith, A., Page, B., Duffy, K., Slotow, R. 2012. Using Maximum Entropy modeling to predict the potential distributions of large trees for conservation planning. *Ecosphere*, DOI:10.1890/ES12-000531.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L. 2007. Summary for Policymakers. Cambridge University Press: Cambridge.
- Spittlehouse, D., Stewart, R. 2004. Adaptation to climate change in forest management. *Journal of Ecosystem Management*, 4(1):1-11.
- Swihart, R., Gehring, T., Kolozsvary, M., Nupp, T. 2003. Responses of “resistant” vertebrates to habitat loss and fragmentation: the importance of niche breadth and range boundaries. *Diversity and Distributions*, 9:1-18.
- Taylor, M., Centella-Artola, A, Charlery, J., Borrajero I, Bezanilla-Morlot, A, Campbell J, Rivero-Vega, R, Stephenson TS, Whyte F, Watson R. 2007. In Glimpses of the Future: A Briefing from the PRECIS Caribbean Climate Change Project. Caribbean Community Climate Change Centre: Belmopan, Belize.
- Tchebakova, N., Parfenova, E. 2012. The 21<sup>st</sup> century climate change effects on the forests and primary conifers in central Siberia. *Bosque*, 333:253-259.

- Thuiller, W., Lafourcade, B., Engler, R., Araujo, M. 2009. BIOMOD a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, 32:369-373.
- Townsend, A., Papes, M., Eaton, M. 2007. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and MaxEnt. *Ecography*, 30:550-560.
- Trisurat, Y., Alkemade, R., Arets, E. 2009. Projecting forest distributions and adaptation to climate change in northern Thailand. *Journal of Ecology and Natural Environment*, 1(3):055-063.
- Turner, E. 2003. Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology and Evolution*, 18:306-318.
- Vega, R., Cutié-Cancino, V., Centella-Artola, A. 1987. Análisis del comportamiento de los totales lluvia caída en Cuba sobre la base de una clasificación de sequía. Informe Técnico. Instituto de Meteorología. Cuba. 25 pp.
- Vose, J. M., Peterson, D. L. Patel-Weynand, T. 2012. Effects of climatic variability and change on forest ecosystems: a comprehensive science synthesis for the U.S. forest sector. General Technical Report No. PNW-GTR-870. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station: 265 pp.
- Wakie, T., Evangelista, P., Jarnevich, C., Laituri, M. 2014. Mapping Current and Potential Distribution of Non-Native *Prosopis juliflora* in the Afar Region of Ethiopia. *PLOS ONE* 9 (11):e112854; DOI:10.1371/journal.pone.0112854
- Warren, D., Seifert, S. 2011. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological Applications*, 21(2):335-342.

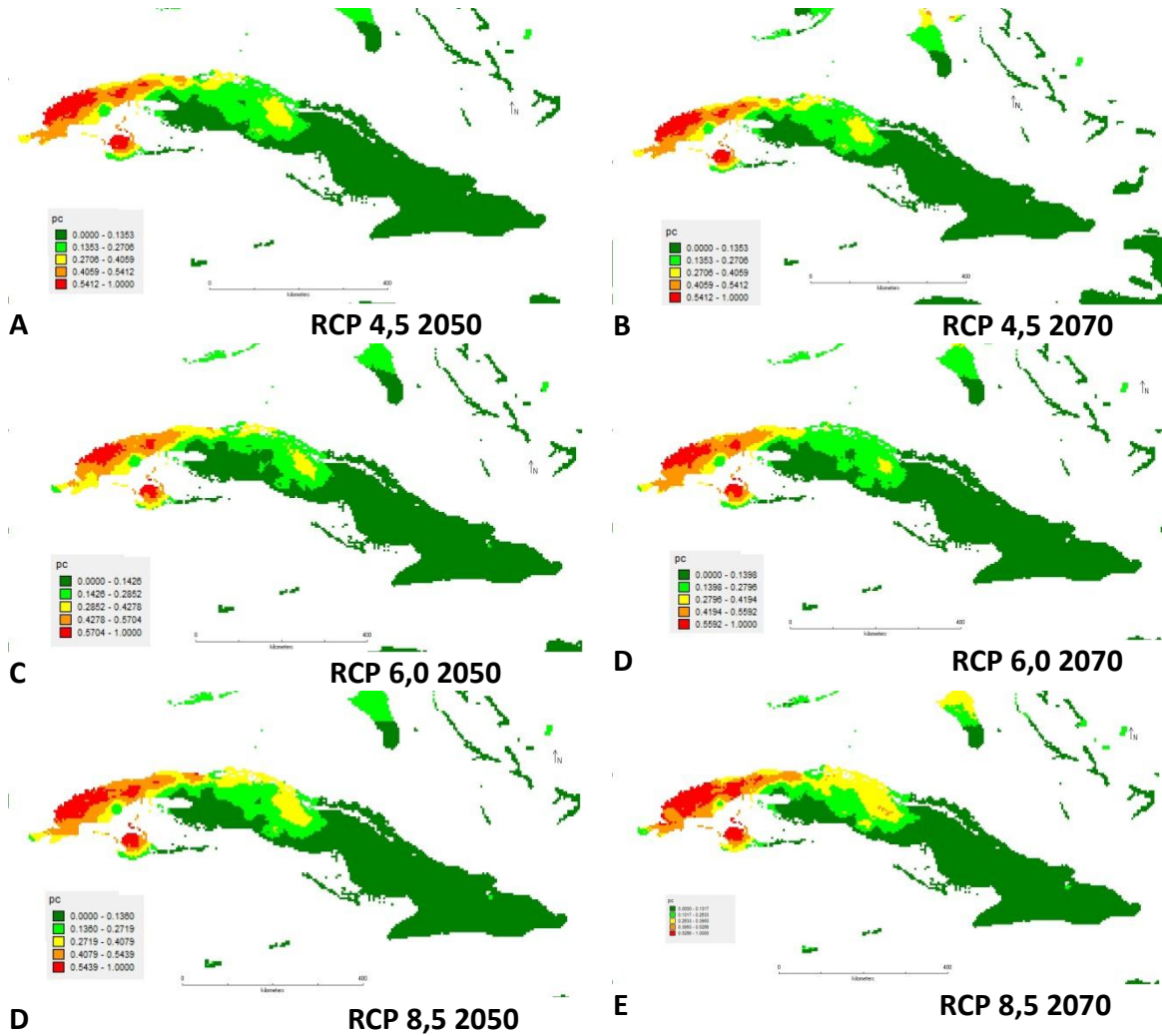
Zalasiewicz, J. 2008. Are we now living in the Anthropocene? *GSA Today*, 18(2): 4-8.

Zank, C., A. Gertum, A. Michelle, D. Baldo, R. Maneyro, M. Borges-Martins. 2014. Climate change and the distribution of Neotropical red-bellied toad (*Melanophryniscus*, Anura, Amphibia): how to prioritize the species and populations? *PLOS ONE* 9(4): e94625. doi:10.1371/journal.pone.0094625.



## ANEXOS

Anexo 1. Probabilidad de nicho climático para los pinares de *Pinus caribaea*. Ensamblajes del Modelo climático global HadGEM-ES para RCP 4,5; 6,0 y 8,5 de los años 2050 y 2070



Anexo 2. Probabilidad de nicho climático para pinares de *Pinus tropicalis*. Ensamblajes del

Modelo climático global HadGEM-ES para RCP 4,5; 6,0 y 8,5 de los años 2050 y 2070

