



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

---

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN  
EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**SOCIOECONOMÍA, ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA  
ESTADÍSTICA**

**Estimación del riesgo de heladas en la agricultura  
aplicando Teoría de Valores Extremos**

Omar Reyes García

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO  
2016**

---

---

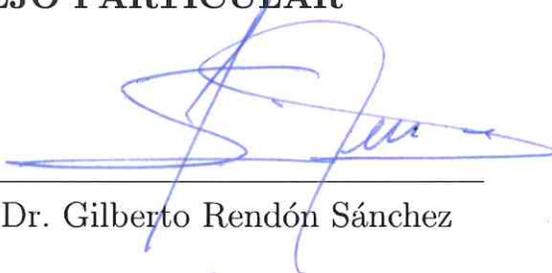
La presente tesis titulada: **Estimación del riesgo de heladas en la agricultura aplicando Teoría de Valores Extremos**, realizada por el alumno: **Omar Reyes García**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

## MAESTRO EN CIENCIAS

### SOCIOECONOMÍA, ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA ESTADÍSTICA

#### CONSEJO PARTICULAR

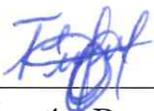
CONSEJERO



---

Dr. Gilberto Rendón Sánchez

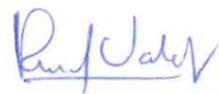
ASESOR



---

Dr. Filemón Ramírez Pérez

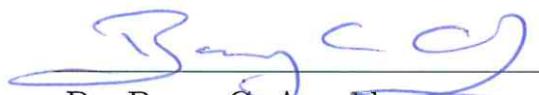
ASESOR



---

Dr. José René Valdez Lazalde

ASESOR



---

Dr. Barry C. Arnold

Montecillo, Texcoco, México, Julio del 2016

# Estimación del riesgo de heladas en la agricultura aplicando Teoría de Valores Extremos

Omar Reyes García

Colegio de Postgraduados, 2016

La presencia de heladas en las zonas templadas de México, afecta seriamente el volumen y el valor de la producción agrícola, ocasionando pérdidas económicas importantes para los productores y desabasto de alimentos. Ante ésta problemática, se requiere información estadística confiable acerca de la ocurrencia de heladas tardías y tempranas, que permita tomar decisiones acertadas en la planeación de la producción, así como las medidas necesarias de prevención. En este contexto, este trabajo tiene como objetivo caracterizar el régimen de ocurrencia de heladas de  $0^{\circ}\text{C}$  y los periodos libres de heladas en el Estado de México mediante la estimación de la probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada desde un enfoque de eventos extremos. Los datos usados corresponden a la temperatura mínima diaria registrada entre 1980 y 2010, que son tomados del CLICOM (Servicio Meteorológico Nacional, 2015). Las estimaciones de probabilidades de ocurrencia de heladas, se basan en la propuesta de Thom (1959) reemplazando la distribución normal por la distribución Weibull, ya que ésta presenta mayor sensibilidad en el análisis de las colas para la estimación de riesgos. Adicionalmente, se modela la intensidad de la temperatura mínima de la primera y última helada con la distribución Generalizada de Valores Extremos. Los resultados de las estimaciones planteadas, son presentados en tablas y mapas de riesgo de ocurrencia de heladas. Se concluye que la distribución Weibull presentó un ajuste satisfactorio a los datos de acuerdo con el Criterio de Información de Akaike (AIC), y permitió caracterizar satisfactoriamente el régimen de ocurrencia de las heladas en el Estado de México.

**Palabras clave:** Periodo libre de heladas, temperatura mínima, distribución Weibull, agrometeorología.

# Estimating the risk of frost in agriculture through Extreme Value Theory

Omar Reyes García

Colegio de Postgraduados, 2016

The presence of frost in the temperate zones of Mexico seriously affects the volume and value of agricultural production, causing significant economic losses for producers and food shortages. Faced at this problem, it is necessary to have reliable statistical information about the occurrence of late and early frost, and that allows to make the right decisions in production planning as well as the necessary preventive measures. In this context, this work aims to characterize the regime of occurrence of frost of  $0^{\circ}\text{C}$  and free periods of frost in the State of Mexico by estimating the probability of occurrence of the first and last frost from an approach of extreme events. The data used correspond to the daily minimum temperature recorded between 1980 and 2010, they were taken from CLICOM (Servicio Nacional Meteorológico, 2015). Estimates of probabilities of occurrence of frost are based on the Thom proposal (1959) by replacing the normal distribution by the Weibull distribution, since it presents greater sensitivity in analyzing tails for estimating risks. Additionally, the intensity of the minimum temperature of the first and last frost was modeled with Generalized Extreme Value distribution. The results of the estimates are presented in date tables and risk maps of occurrence of frost. It is concluded that the Weibull distribution presented a satisfactory fit to the data according to the Akaike Information Criterion (AIC) adjustment, and it allowed successfully characterize the regime of occurrence of frost in State of Mexico.

**Key words:** Frost-free period, minimum temperature, Weibull distribution, agrometeorology.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento brindado durante la realización de mis estudios de maestría en el Colegio de Postgraduados.

Al Colegio de Postgraduados, por haberme brindado la oportunidad de seguir mi formación académica, y especialmente al Postgrado de Estadística por todas las facilidades y oportunidades que me ha brindado a través de sus profesores y personal administrativo.

Al Dr. Humberto Vaquera Huerta, muy especialmente por su confianza, su apoyo incondicional y por sus conocimientos compartidos que sin duda han contribuido tanto a mi formación, como al presente trabajo.

A los integrantes de mi Consejo Particular:

Al Dr. Gilberto Rendón Sánchez por su invaluable apoyo y atenciones como Consejero durante la realización de mis actividades académicas en Estadística, entre las que se incluye el presente trabajo.

A Dr. José René Valdez Lazalde por su valiosa colaboración en la revisión de este trabajo.

Al Dr. Filemón Ramírez Pérez por amistad y conocimientos brindados y su atención durante este proceso.

Al Dr. Barry C. Arnold, por la distinción al aceptar formar parte de mi Consejo Particular.

A mis familiares y amigos que me han apoyado incondicionalmente y que de alguna manera, son copartícipes de esta tarea. Especialmente a mis compañeros Julio, Francisco, Alejandro, Nancy y Humberto por formar parte de esta etapa tan importante para mí.

## DEDICATORIA

A mis padres ...

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>3</b>
2.1. Objetivos Generales . . . . .	3
2.2. Objetivos Particulares . . . . .	3
<b>3. Marco Teórico</b>	<b>4</b>
3.1. Análisis estadístico de datos meteorológicos . . . . .	4
3.2. Heladas en México . . . . .	5
3.2.1. Conceptos Básicos . . . . .	5
3.2.2. Caracterización de las heladas . . . . .	6
3.2.3. Daños ocasionados a los cultivos por las heladas . . . . .	8
3.2.4. Estudios realizados sobre las heladas en México . . . . .	9
3.2.5. Distribución espacial de las heladas en México . . . . .	10
3.3. Aspectos agroclimatológicos relacionados al cultivo del maíz. . . . .	11
3.3.1. Temperaturas Cardinales . . . . .	11
3.3.2. Resistencia de los cultivos a heladas . . . . .	12
3.3.3. Estación de Crecimiento y Probable Estación de Crecimiento . . . . .	13

3.3.4.	Producción y Estacionalidad del cultivo del maíz . . . . .	14
3.4.	Teoría de Valores Extremos . . . . .	15
3.4.1.	Antecedentes y aplicaciones . . . . .	15
3.4.2.	Distribuciones límites del máximo y mínimo . . . . .	16
3.4.3.	Distribución de Valores Extremos (DVE): Fisher-Tippet, Gnedenko . . . . .	18
3.4.4.	Distribución Generalizada de Valores Extremos (DGVE). Condición de Jenkinson-von Misses . . . . .	19
3.4.5.	Distribución Generalizada de Pareto . . . . .	20
3.4.6.	Método de Picos sobre umbrales (POT) . . . . .	20
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>21</b>
4.1.	Área de Estudio . . . . .	21
4.2.	Base de Datos . . . . .	22
4.3.	Sistematización de datos . . . . .	23
4.3.1.	Selección del umbral . . . . .	23
4.3.2.	Selección del variables . . . . .	23
4.3.3.	Selección de Estaciones Meteorológicas . . . . .	24
4.4.	Análisis de ocurrencia de heladas . . . . .	25
4.4.1.	Método de Thom (1959) . . . . .	27
4.4.2.	Funciones de distribución propuestas para ajustar a los datos . . . . .	29
4.4.3.	Estimación de parámetros . . . . .	29
4.4.4.	Pruebas de Bondad de Ajuste . . . . .	30
4.4.5.	Selección de una función de distribución teórica . . . . .	32
4.4.6.	Calculo de probabilidad de ocurrencia de heladas . . . . .	34

# Índice

---

4.5. Periodo Libre de Heladas . . . . .	36
4.6. Análisis de intensidad de las heladas . . . . .	37
4.6.1. Periodos de Retorno . . . . .	40
4.7. Elaboración de mapas de riesgos de ocurrencia e intensidad de las heladas	42
<b>5. Resultados</b>	<b>43</b>
5.1. Régimen de ocurrencia de heladas . . . . .	43
5.2. Estimación de la fecha de la última helada (UH), primera helada (PH) .	45
5.2.1. Mapas de riesgo: Últimas y Primeras Heladas . . . . .	50
5.2.2. Mapas de riesgo: Periodo Libre de Helada . . . . .	58
5.3. Intensidad de las heladas y periodos de retorno . . . . .	61
5.3.1. Mapas de intensidad . . . . .	67
<b>6. Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>69</b>
<b>Referencias</b>	<b>70</b>
<b>Anexos</b>	<b>75</b>
Anexo A: Algoritmo para Estimación de: la Ultima Helada, Primera Helada y Periodo Libre de Heladas . . . . .	75
Anexo B: Mapas de referencia . . . . .	81
Anexo C: Gráficas de Probabilidad de Ocurrencia de la Primera y Ultima Helada	83

# Índice de cuadros

3.1. Temperaturas (°C) umbrales para algunos cultivos . . . . .	11
3.2. Resistencia de los cultivos a las heladas en diferentes fases de desarrollo .	12
3.3. Producción de Maíz en el Estado de México en el 2014. . . . .	14
4.1. Estaciones seleccionadas por Estado . . . . .	22
4.2. Fechas de ocurrencia y temperaturas de la última y primera helada. Estación 15010. Atotonilco, Almoloya de Juárez, Méx. . . . .	25
4.3. Pruebas de bondad de ajuste: Atotonilco, Almoloya de Juárez, México . .	31
4.4. Número de estaciones ajustadas en cada distribución, seleccionadas de acuerdo con las pruebas de bondad de ajuste . . . . .	33
4.5. Fechas de ocurrencia y temperaturas de la última y la primera helada. Estación 15025. Ejido de Llano Grande, Jipilco, Méx. (1980-2010) . . . . .	40
5.1. Fechas de Ocurrencia de la Última y Primera Helada y Periodo Libre de Heladas en los estados de D.F. y Guanajuato. . . . .	46
5.2. Fechas de Ocurrencia de la Última y Primera Helada y Periodo Libre de Heladas en el estado de Hidalgo. . . . .	47
5.3. Fechas de Ocurrencia de la Última y Primera Helada y Periodo Libre de Heladas en el estado de México. . . . .	47
5.4. Fechas de Ocurrencia de la Última y Primera Helada y Periodo Libre de Heladas en el estado de Michoacán, Morelos . . . . .	49

## Índice de cuadros

---

5.5. Fechas de Ocurrencia de la Última y Primera Helada y Periodo Libre de Heladas en el estado de Puebla y Querétaro . . . . .	49
5.6. Fechas de Ocurrencia de la Última y Primera Helada y Periodo Libre de Heladas en el estado de Tlaxcala . . . . .	50
5.7. Diferencia (días) de estimaciones del modelo Normal respecto al Weibull	57
5.8. Periodos de Retorno (Años) de las Temperaturas Mínimas Extremas en los estados de D.F. y Guanajuato . . . . .	62
5.9. Periodos de Retorno (Años) de las Temperaturas Mínimas Extremas en el estado de Hidalgo . . . . .	63
5.10. Periodos de Retorno (Años) de las Temperaturas Mínimas Extremas en el estado de México . . . . .	64
5.11. Periodos de Retorno (Años) de las Temperaturas Mínimas Extremas en el estado de Michoacán y Morelos . . . . .	65
5.12. Periodos de Retorno (Años) de las Temperaturas Mínimas Extremas en el estado de Puebla, Querétaro y Tlaxcala . . . . .	66

# Índice de figuras

3.1. Distribución de los días libres de heladas en México . . . . .	10
3.2. Calendario Agrícola 2006 . . . . .	14
4.1. Serie de temperaturas mínimas: Ejido de Llano Grande, Jipilco, Méx. . .	23
4.2. Distribución de las fechas de ocurrencia de heladas: Almoloya de Juárez, México . . . . .	26
4.3. Distribución de las fechas de ocurrencia de heladas: Jipilco, México . . .	26
4.4. Ajuste de distribuciones teóricas: Almoloya de Juárez, Méx. . . . .	30
4.5. Gráficos Q Q . . . . .	32
4.6. Distribución de las fechas de ocurrencia de heladas tardías y tempranas .	33
4.7. Probabilidad de ocurrencia de la Primera y Última Helada usando la Dis- tribución Weibull. Estación: Atotonilco, Almoloya de Juárez, Méx. . . . .	34
4.8. Probabilidad de ocurrencia de la Primera y Última Helada usando la Dis- tribución Normal. Estación: Atotonilco, Almoloya de Juárez, Méx. . . . .	35
4.9. Comparación de la Probabilidad de ocurrencia de la Primera y Última He- lada, modeladas mediante las distribuciones Normal y Weibull. Estación: Atotonilco, Almoloya de Juárez, Méx. . . . .	36
4.10. Variabilidad en el nivel de las series de temperatura mínima . . . . .	37
4.11. Ajuste de la distribución GVE a los datos de temperaturas mínimas usando el método L-momentos: Atotonilco, Almoloya de Juárez, Méx. . . . .	38

## Índice de figuras

---

4.12. Gráficas de Ajuste: Ultimas Heladas, Jipilco, Méx. . . . .	39
4.13. Gráficas de Ajuste: Primeras Heladas, Jipilco, Méx. . . . .	39
5.1. Mapa de probabilidad de ocurrencia de heladas tardías y tempranas . . .	44
5.2. Mapa de riesgo ocurrencia de heladas tardías con probabilidad del 5 %, modelado con la distribución Weibull. . . . .	52
5.3. Mapa de riesgo de ocurrencia de heladas tardías con probabilidad del 10 %, modelado con la distribución Weibull. . . . .	52
5.4. Mapa de riesgo de ocurrencia de heladas tardías con probabilidad del 20 %, modelado con la Distribución Weibull. . . . .	53
5.5. Mapa de riesgo de ocurrencia de heladas tardías con probabilidad del 20 %, modelado con la Distribución Normal. . . . .	53
5.6. Dispersión y correlación entre la ocurrencia de la última y primera helada, el periodo libre de heladas y la altitud. . . . .	54
5.7. Mapa de riesgo de ocurrencia de heladas tempranas con probabilidad del 5 %, modelado con la distribución Weibull. . . . .	55
5.8. Mapa de riesgo de ocurrencia de heladas tempranas con probabilidad del 10 %, modelado con la Distribución Weibull. . . . .	56
5.9. Mapa de riesgo de ocurrencia de heladas tempranas con probabilidad del 10 %, modelado con la Distribución Normal. . . . .	56
5.10. Mapa de riesgo de ocurrencia de heladas tempranas con probabilidad del 20 %, modelado con la distribución Weibull. . . . .	57
5.11. Periodo Libre de Heladas estimado a un riesgo máximo entre la última y la primera helada de 5-5 %. Modelo: Distribución Weibull. . . . .	59
5.12. Periodo Libre de Heladas estimado a un riesgo máximo entre la última y la primera helada de 10-10 %. Modelo: Distribución Weibull. . . . .	59
5.13. Periodo Libre de Heladas estimado a un riesgo máximo entre la última y la primera helada de 20-10 %. Modelo: Distribución Weibull. . . . .	60
5.14. Periodo Libre de Heladas estimado a un riesgo máximo entre la última y la primera helada de 20-10 %. Modelo: Distribución Normal. . . . .	60

## Índice de figuras

---

5.15. Periodo Libre de Heladas estimado a un riesgo máximo entre la última y la primera helada de 20-20 %. Modelo: Distribución Weibull. . . . .	61
5.16. Intensidad de la temperatura de Última Helada . . . . .	67
5.17. Intensidad de la temperatura de Primera Helada . . . . .	68

# Capítulo 1

## Introducción

Uno de los principales temas de interés actualmente son los estudios sobre cambio climático y la elaboración de pronósticos y modelos de variables climáticas aplicados en diversas áreas. Hoy en día, existe una demanda creciente de metodologías especializadas y análisis de datos meteorológicos y datos de extremos que permitan caracterizar de manera confiable los diferentes fenómenos naturales, con la finalidad de prevenir los efectos e impactos de los desastres naturales en el medio ambiente y en la sociedad. [Guttorp \*et al.\* \(2012\)](#).

Como efectos del cambio climático, se registran diversos desastres naturales o eventos extremos de índole meteorológica, como inundaciones, sequías, olas de calor y heladas, los cuales se traducen en importantes pérdidas económicas y problemas sociales, principalmente en el sector agrícola. Por lo que, en el contexto de la actual crisis internacional de precios de los alimentos, el análisis estadístico de los eventos climáticos extremos juegan un papel importante.

Un enfoque razonable para el estudio de los desastres naturales como eventos raros es analizarlos mediante la aplicación de la Teoría de Valores Extremos [Coles \(2001\)](#). En climatología existen ya muchas aplicaciones en modelación de extremos de precipitación y temperaturas, estudios de gran relevancia dadas las consecuencias de estos fenómenos en diferentes ámbitos, entre ellos el medio ambiente, la agricultura, la economía y la población. Respecto a extremos de temperatura, la mayoría de los estudios existentes se centran los valores máximos, sin embargo, la temperaturas mínimas pueden ser igualmente importante si se considera que éstas son capaces afectar tanto a las plantas y cultivos agrícolas como al ser humano.

Una helada ocurre cuando la temperatura del aire es menor o igual a 0 °C. Como consecuencia de este fenómeno, muchos cultivos sufren daños fisiológicos irreversibles generando así miles de hectáreas siniestradas que se traducen en importantes pérdidas económicas. El grado de afectación en las plantas dependerá de la etapa del cultivo, la intensidad de la helada y de la tolerancia del cultivo a bajas temperaturas.

## 1. Introducción

---

Particularmente, la presencia de heladas en algunas zonas templadas del país, afecta seriamente el volumen y el valor de la producción agropecuaria, así como los rendimientos de cultivos básicos, hortalizas, flores y frutos, lo cual repercute directamente en aspectos socio-económicos para los productores cuya principal actividad económica es la agricultura, ya que se derivan otros problemas relacionados con el bienestar de las familias: bajos ingresos económicos y desabasto de alimentos. Por otro lado, este fenómeno también tiene consecuencias en salud de la población. Por tanto, la elaboración confiable de los pronósticos de ocurrencia de las heladas tiene una importancia práctica durante primavera y otoño a fin de tomar decisiones acertadas en los procesos de producción, así como las medidas necesarias de prevención.

En consecuencia de dicha problemática, se han realizado diversos estudios para pronosticar la ocurrencia de heladas con enfoque agronómico, enfocándose principalmente a la estimación de las fechas de las últimas heladas primaverales, primeras heladas invernales y los periodos libres de heladas. Los métodos se basan en el análisis estadístico de los datos históricos registrados en estaciones meteorológicas locales. Debido a la naturaleza intrínseca de este fenómeno, es de suma importancia considerar además de la distribución temporal, la distribución espacial del fenómeno, esto mediante la aplicación de métodos geoestadísticos.

Actualmente, la región Valles Altos cobra especial importancia dado su alto potencial productivo, sin embargo, se carece de información detallada sobre los regímenes de ocurrencia de las heladas que impactan frecuentemente en el área agrícola de esta región. En particular el Estado de México, es uno de los principales productores de maíz a nivel nacional, de acuerdo con el (SIAP, 2016) el 99.9% de su producción se obtiene del ciclo Primavera-Verano (PV), por lo que sus cultivos podrían verse afectados por la incidencia de heladas tardías y tempranas.

Este trabajo tiene como objetivo caracterizar el régimen y los riesgos de ocurrencia de las primeras y últimas heladas de 0°C, así como los periodos libres de heladas en el Estado de México, relacionados al ciclo vegetativo del cultivo del maíz, mediante la estimación de las probabilidades de ocurrencia desde un enfoque de eventos extremos. La metodología aplicada se basa en la propuesta de Thom (1959), reemplazando la distribución normal por la distribución Weibull, ya que ésta presenta mayor sensibilidad en el análisis de las colas de una distribución de valores extremos. Además, se plantea la elaboración de mapas de riesgo de ocurrencia aplicando principios geoestadísticos para inferir los riesgos en zonas donde no se tenga información disponible o suficiente.

El valor de uso de este análisis surge ante la necesidad de contar con información confiable y fundamentada estadísticamente que sirva para orientar la toma de decisiones en la planeación estratégica y eficiente de los procesos de producción agrícola y prevención de riesgos.

# Capítulo 2

## Objetivos

### 2.1. Objetivos Generales

- Analizar los patrones de distribución espacio-temporal de las heladas tardías y tempranas en el Estado de México y alrededores, mediante la modelación de las fechas de ocurrencia y la intensidad a partir de las temperaturas mínimas históricas, bajo el enfoque de análisis de eventos extremos, apoyado en herramientas geoestadísticas para estimar los riesgos en la agricultura, con la finalidad de proporcionar información que contribuya a mitigar sus efectos adversos.

### 2.2. Objetivos Particulares

- Estimar las fechas de ocurrencia de la última y la primera helada admitiendo un riesgo máximo del 20 y 10 % de probabilidad de ocurrencia respectivamente, basado en el ciclo vegetativo del cultivo de maíz y su nivel de tolerancia a heladas.
- Estimar el Periodo Libre de Heladas para establecer la “probable estación de crecimiento” del cultivo del maíz.
- Modelar la intensidad de las temperaturas mínimas extremas registradas en las primeras y últimas heladas, aplicando la Teoría de Valores Extremos.
- Elaborar mapas de riesgo de ocurrencia y mapas de intensidad de las primeras y últimas heladas, que permitan identificar los momentos y las áreas críticas que limitan en desarrollo de los cultivos.

# Capítulo 3

## Marco Teórico

### 3.1. Análisis estadístico de datos meteorológicos

Uno de los principales temas de interés actualmente son los estudios sobre cambio climático, por lo que su demanda va en aumento y ofrece un amplio campo por explorar para investigadores de diferentes áreas. La elaboración de éstos estudios exigen estimaciones confiables de la variabilidad del clima y pronósticos a corto y largo plazo, por lo que deben estar fundamentados en el método científico y en análisis estadísticos acordes con los diferentes fenómenos estudiados. La confiabilidad de los resultados de informes climáticos, dependerá sustancialmente del proceso de compilación, captura de bases de datos y la correcta selección de los métodos de análisis y modelos estadísticos, por lo que el papel del especialista en estadística es fundamental en este proceso.

En climatología existe una gran demanda de metodologías y análisis estadísticos de datos meteorológicos históricos, afrontar esta labor conlleva una serie de problemas prácticos: bases de datos incompletas, series de datos no estacionarias, dependencia espacial y temporal, e incumplimiento de algunos supuestos importantes en la aplicación de metodologías convencionales. Éstos retos, abren un amplio panorama de oportunidades de aplicaciones estadísticas en el campo de las ciencias del clima.

Los estadísticos deben ser capaces de contribuir considerablemente a cuestiones tales como la comparación visual de campos espaciales, estimación no paramétrica de las tendencias no lineales en los datos con múltiples escalas de dependencia, modelos estocásticos para la reducción de escala de los modelos climáticos a escala regional y local, el tratamiento de extremos espacio-temporales de datos y en los modelos climáticos, los estudios de la salud pública y los efectos ecológicos del cambio climático, y mucho más. Este esfuerzo científico puede beneficiar considerablemente de contribuciones estadísticas porque los datos son abundantes y el impacto social potencial es grande ([Guttorp, 2014](#)).

## 3.2. Heladas en México

### 3.2.1. Conceptos Básicos

Para una mejor comprensión de la lectura, a continuación se presentan las definiciones de algunos conceptos técnicos utilizados en este estudio:

**Definición 3.1 Helada.** *Desde el punto de vista meteorológico, se presenta cuando la temperatura del aire es menor o igual a  $0^{\circ}\text{C}$ , registrada en un termómetro de mínima instalado en la garita meteorológica a 1.5 m sobre el nivel del suelo y obviamente sin anotaciones referentes a su intensidad, duración y origen. Sin embargo, desde una perspectiva agrometeorológica la definición cambia, una helada ocurre cuando la temperatura del aire desciende a temperaturas tan bajas, que provocan la muerte de los tejidos vegetales (Romo y Arteaga, 1989).*

**Definición 3.2 Primera y Última Helada** Grassi et al. (1986) *considera la última helada a la más tardía ocurrida en el primer semestre del año, medida en días transcurridos desde el primero de enero a la fecha de ocurrencia de ésta y, la primera helada a la más temprana ocurrida en el segundo semestre del año medidas en días transcurridos desde el primero de enero a la fecha de ocurrencia de ésta.*

**Definición 3.3 Periodo Libre de Heladas (PLH)** *Se considera como el tiempo (en días) que transcurre desde que se presentó la última helada de un periodo hasta la primera helada del periodo siguiente (Torres, 1995). Considerando varios años, podemos obtener el promedio del PLH para alguna región. En el caso de que se presenten años sin heladas aparecerán periodos libres de heladas de mas de 365 días, lo que no representa ningún inconveniente siempre y cuando se divida entre el número total de años estudiados, aún cuando hubiera helado en una parte de ellos.*

*El PLH así como el estudio de sus desviaciones, constituye un elemento de vital importancia en la planeación del establecimiento de un cultivo en una zona determinada, además, debe considerarse que el ciclo vegetativo del cultivo o por lo menos la duración del periodo sensible a las heladas sea menos que el periodo promedio libre de heladas que caracteriza a dicha zona. De otra manera, las cosechas se verán afectadas en calidad y cantidad por efecto de las heladas, a menos que se establezcan sistemas de combate alas mismas, los cual no siempre es recomendable o redituable (Romo y Arteaga, 1989).*

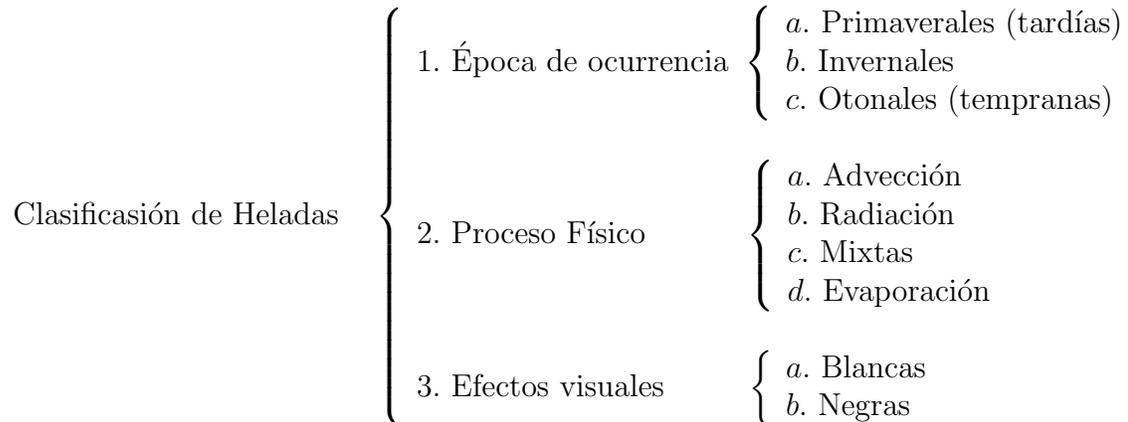
### 3.2.2. Caracterización de las heladas

Una caracterización agroclimática de las heladas debe contemplar el estudio de los siguientes elementos:

1. **Época de ocurrencia.** La ocurrencia de heladas posee un comportamiento cíclico anual que consta de dos periodos: el periodo de heladas y el periodo libre de heladas. Para definir dichos periodos, se estudian las fechas extremas y medias de la última y primera helada, conjuntamente con el periodo libre de heladas o bien mediante el análisis de frecuencia y probabilidad de las mismas, que agrónomicamente pueden tener mayor significado que el estudio de los valores medios. El cálculo de la probabilidad de ocurrencia de una helada en una fecha determinada no es muy preciso, por tanto, es importante considerar la variabilidad, generando así un intervalo estimado en el cual puede presentarse una helada.
2. **Frecuencia.** Está dada por el número de veces que ha ocurrido el fenómeno, en un periodo determinado (bloques anuales y/o mensuales). Esta variable puede ser modelada mediante el ajuste de alguna función de distribución de probabilidad teórica a los datos, que permita realizar inferencia estadística sobre el fenómeno estudiado. Posteriormente, se pueden realizar el calculo de los periodos de retorno de un evento para alguna magnitud de interés o algún umbral crítico.
3. **Intensidad.** Considera la magnitud del fenómeno en grados centígrados, temperaturas extremadamente bajas aumentan la peligrosidad de las heladas. Se aborda mediante el análisis estadístico de los valores mínimos mensuales o anuales de temperatura registrados en las distintas estaciones meteorológicas que componen la red.
4. **Duración.** Se refiere al tiempo que transcurre mientras la temperatura mínima se encuentra por abajo de 0°C o una temperatura crítica específica para algún cultivo, el cual puede ir de unos minutos a horas. Este análisis requiere de datos continuos o en intervalos pequeños medidos en minutos.
5. **Peligrosidad de las heladas.** Se evalúa mediante índices que relacionan el valor de la fecha media de ocurrencia de la primera y última helada, su dispersión y el estado fenológico de las plantas. [Burgos \(1947\)](#), [Lindkvist y Chen \(1999\)](#), [Pascale y Damarío \(2004\)](#) y [Fernández \*et al.\* \(2007\)](#) han propuesto índices de peligrosidad.
6. **Tipo de helada** Las heladas pueden clasificarse de acuerdo con su época de ocurrencia, el proceso físico que las origina y por los efectos visuales que causan sobre los cultivos ([Romo y Arteaga, 1989](#)):

### 3.2. Heladas en México

---



En México, la ocurrencia de heladas se presenta con mayor frecuencia en la época de invierno (heladas invernales) y desaparecen a medida que se acerca el verano, cuando se presenta un periodo libre de heladas. Normalmente las primeras heladas ocurren durante el otoño y se les conoce como heladas tempranas, mientras que las últimas heladas ocurren en primavera y son llamadas heladas tardías, ambas representan un alto riesgo para los cultivos, ya que inciden en los momentos de mayor actividad vegetativa. Cabe mencionar que las tardías son las más peligrosas.

Las heladas por advección son generadas por grandes masas de aire frío procedentes de regiones polares, cuya acción es continua y por varios días, pueden ocurrir en el día o la noche acompañadas por vientos.

Las heladas de radiación se originan por la pérdida de calor de las plantas y el suelo y que ceden a la atmósfera durante la noche, por el proceso de radiación. Se produce bajo condiciones de ausencia de vientos, cielos despejados y sequía atmosférica. La inversión térmica es característica de estas heladas, proceso que ocasiona temperaturas más bajas a nivel del suelo con respecto a niveles más altos, es decir a mayor altura, mayor es la temperatura del aire y viceversa.

Las heladas mixtas son combinaciones de los dos casos anteriores, con ocurrencias simultáneas o turnadas.

Las heladas de evaporación se producen cuando después de una precipitación desciende la humedad relativa del aire, ocasionando que el agua depositada sobre las plantas se evapore rápidamente con el consiguiente enfriamiento al ser absorbido del aire el calor latente (Castillo y Sentís, 2001).

Una helada blanca se presenta después de las noches despejadas, frías y sin viento las plantas bajas en lugar de parecer cubiertas de rocío, en ocasiones presentan una cubierta de hielo, debido a la presencia de aire seco que se enfría rápidamente durante la noche

## 3.2. Heladas en México

---

hasta alcanzar el punto de rocío condensándose y formando hielo ante la presencia de temperaturas inferiores a los 0°C. Por otra parte, una helada negra ocurre cuando el aire se encuentra excesivamente seco y la temperatura de punto de rocío abajo de los 0°C no se alcanza. Si bien no se produce una helada blanca, los cultivos son dañados y al día siguiente las plantas presentan manchas necróticas en sus partes afectadas. En este caso, no se congela el vapor del aire, pero se puede congelar la savia de las palntas, o bien congelarse el agua en los tejidos que aumentan el volumen y los rompe (Torres, 1983).

### 3.2.3. Daños ocasionados a los cultivos por las heladas

Los efectos dañinos sobre los cultivos no siempre son los mismos, varían en su intensidad de acuerdo con factores tales como la etapa fenológica, la especie y variedad, temperatura y contenido hídrico de la planta, intensidad y duración de la helada y el tipo de órgano expuesto. De esta forma los daños van desde la muerte parcial o total de los órganos vegetativos, tales como hojas, flores, frutos y tallos, perturbando las funciones de los órganos restantes (Romo y Arteaga, 1989).

Da Fina y Ravelo (1975) y Torres (1983), establecen cuatro grados de daños en cultivos agrícolas, que involucran la acción de los factores anteriores:

- *Primer Grado.* Muerte de algunos órganos vegetativos como hojas y tallos tiernos; perturbación de funciones en el resto de los órganos.
- *Segundo Grado.* Destrucción de gran porcentaje de las flores y partes vegetativas, impidiendo que las flores se transformen en frutos.
- *Tercer Grado.* Destrucción de frutos en formación, y deformación de los sobrevivientes.
- *Cuarto Grado.* El frío es lo suficientemente intenso y prolongado para provocar la muerte de la planta completa.

Burgos y Hirschhorn (1963), menciona tres tipos de causas fisiológicas de los daños por heladas:

1. *Daños por desecación.* Se produce cuando la velocidad de absorción de agua se ve disminuidas por las bajas temperaturas, sufriendo la planta una marchitez temporal causada por falta de agua suficiente para cubrir su tasa de transpiración.
2. *Daños por enfriamiento.* Ocurren cuando la temperatura supera el punto de congelamiento, sobre todo, en plantas tropicales y subtropicales debido a perturbaciones en las actividades metabólicas y en las condiciones fisiológicas de las células.

## 3.2. Heladas en México

---

3. *Daños por congelamiento.* Al descender la temperatura por abajo de los 0°C es común, sobre todo en climas templados la formación de hielo en el interior de las plantas. En el congelamiento intracelular, los cristales de hielo producen la desorganización de la estructura protoplasmática, sobreviniendo la muerte de la célula. Cuando el hielo se forma en los espacios intercelulares la muerte puede producirse por deformaciones mecánicas del protoplasma, ya sea por presión directa o por la salida del agua de la célula.

### 3.2.4. Estudios realizados sobre las heladas en México

Los estudios que se han desarrollado en México en torno al fenómeno de las heladas son muy variados, y los métodos aplicados dependen de la finalidad de la investigación. Desde el punto de vista agronómico, uno de los principales objetivos ha sido establecer Periodos Libres de Heladas y calcular las probabilidades de ocurrencias en determinadas fechas a partir de registros históricos de temperaturas mínimas en estaciones meteorológicas locales. Para este propósito, el método más utilizado es propuesto por [Thom \(1959\)](#), y se basa en el ajuste de las fechas de ocurrencia de una helada tardía o temprana a una distribución Normal para realizar inferencia estadística sobre el fenómeno. Algunas aplicaciones fueron realizadas por [Grassi et al. \(1986\)](#), [Mora \(2015\)](#) en Tlaxcala y Puebla, [Díaz et al. \(2009\)](#) en Aguascalientes. [Bravo \(1992\)](#), además de éste enfoque, emplea la metodolgia de Box-Jenkin para realizar pronósticos diarios en Sonora.

Otro estudio para realizar pronósticos diarios de heladas tempranas fue realizado por [Montesinos et al. \(1988\)](#), considerando cinco variables climatológicas (temperatura, punto de rocío, porcentaje de cielo despejado, rumbo y velocidad del viento) y aplicando un análisis de discriminantes.

[Vazquez et al. \(1992\)](#) compara el método de Thom con los propuestos por [Ortíz y Pajaro \(1992\)](#) y por [Arteaga \(1988\)](#), y concluye que es el método con mejor ajuste para estimar las de fechas de ocurrencia de la primera y última helada en el Centro y Norte de México.

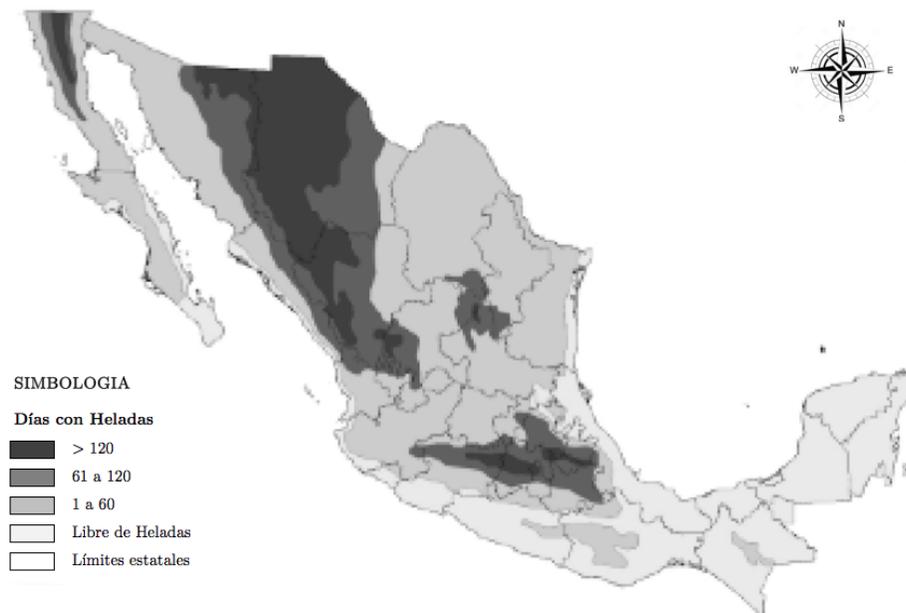
[García y Valdéz \(1986\)](#) en Baja California, realizan un estudio de evaluación del cambio climático que considera las temperaturas mínimas extremas anuales modeladas con la distribución generalizada de valores extremos, sin embargo, considera únicamente la helada más intensa del año, sin considerar la fecha de ocurrencia.

En el sector de salud y protección civil en Monterrey, N.L., [Ríos-Alejandro \(2011\)](#), aborda este fenómeno desde la perspectiva de Valores Extremos ajustando datos de la temperatura mínima anual a una distribución Gumbel y estimando periodos de retorno.

## 3.2. Heladas en México

### 3.2.5. Distribución espacial de las heladas en México

En México, la distribución de las heladas se manifiesta, principalmente en dos grandes regiones, la primera y la más extensa está sobre las sierras Tarahumara, de Durango y Tepehuanes, que comprende a los estados de Chihuahua, Durango, Sonora y Zacatecas; la segunda, aunque no de menor importancia se localiza en la parte centro del país, que incluye los estados de Michoacán, Estado de México, Distrito Federal, Tlaxcala, Puebla e Hidalgo, región que limita con el Sistema Volcánico Transversal. Otras áreas expuestas a bajas temperaturas se localizan en las Sierras de San Pedro Mártir y de Juárez, Baja California. Una más cubre algunas porciones de los estados de San Luis Potosí y Zacatecas, en todas estas regiones existen cerca de 120 días con heladas. En cambio, las zonas costeras poseen ausencia de este fenómeno; como la vertiente del golfo de México, el sur del río Pánuco y hasta la península de Yucatán, e incluso el istmo de Tehuantepec, además de la llanura del océano Pacífico (Matías *et al.*, 2001).



**Figura 3.1:** Distribución de los días libres de heladas en México.

Fuente: Vidal - Zepeda, Rosalía. 2007 citado por Matías *et al.* (2001).  
Días con heladas en México, Hoja Amenazas climáticas. Nuevo Atlas Nacional de México, Instituto de Geografía, UNAM, México (en prensa)

### 3.3. Aspectos agroclimatológicos relacionados al cultivo del maíz.

#### 3.3.1. Temperaturas Cardinales

Cada especie vegetal tiene ciertas temperaturas críticas, también llamada temperaturas cardinales, que definen los requerimientos de calor necesarios para su crecimiento y desarrollo. Las temperaturas cardinales generalmente incluyen la mínima (la temperatura más baja a la cual la planta crece), la óptima (la temperatura a la cual el crecimiento y desarrollo son más favorables) y la máxima (la temperatura más alta a la cual la planta crece). La temperatura óptima para la germinación de la semilla es comúnmente más baja que la temperatura óptima para el desarrollo vegetativo, cuyo valor a su vez, puede ser diferente al mejor valor para la floración o fructificación. Así a través del curso de la vida de la planta, ésta puede tener dos o tres conjuntos de intervalos de temperaturas críticas (Ortíz, 1987). Un claro ejemplo se presenta en el Cuadro 3.1, que muestra las temperaturas críticas para el cultivo de maíz en diferentes fases fisiológicas.

**Cuadro 3.1:** Temperaturas (°C) umbrales para algunos cultivos

Cultivo	Mínima Letal	Mínima Umbral	Óptima	Máxima Umbral	Máxima Letal
<b>Fase de Germinación<sup>1</sup></b>					
Maíz		7.8 - 10	31.7 - 35	40 - 43.9	
<b>Fase de Desarrollo<sup>2</sup></b>					
Maíz		10	29 - 32	32 - 38	
<b>Fase de Crecimiento<sup>3</sup></b>					
<i>- Cereales</i>					
Maíz	0.5	10	15, 35	41	42
Cebada	-8	0	25, 31	37	-
Sorgo	-6	10	27, 29	44	49
Trigo	-9	5	25, 31	37	-
<i>- Hortalizas</i>					
Frijol	3	15	24, 30	35	41
Melón	-1	15	25, 27	-	-
Papa	<-2	-2	17	26	29
Tomate	0	14	18, 24	27	-
Zanahoria	-1	4	7, 29	35	-

Wilsie (1966)<sup>1</sup>, Rahn (1979.)<sup>2</sup>, Wang *et al.* (1982)<sup>3</sup>

### 3.3. Aspectos agroclimatológicos relacionados al cultivo del maíz.

El Cuadro 3.1 muestra los umbrales de temperatura para el crecimiento del cultivo de maíz y otros cultivos de acuerdo con Wang *et al.* (1982)

Por otro lado, Wilsie (1966) estudia el número de días que transcurren desde la siembra hasta la germinación del grano de maíz a diferentes temperaturas y reporta que a 4.4°C, no germina, a 12.2°C germina a los 11 días, y a una temperatura mayor a 15.5°C germina a los 3 días.

#### 3.3.2. Resistencia de los cultivos a heladas

Ventskevichh (1961), evalúa y clasifica la resistencia de algunos cultivos a las heladas en función de la fase de su desarrollo (Cuadro 3.2). De acuerdo con este autor, el maíz está clasificado como “Escasamente resistente a las heladas”.

**Cuadro 3.2:** Resistencia de los cultivos a las heladas en diferentes fases de desarrollo

Nivel de Resistencia	Temperaturas (°C) dañinas a las plantas por fase					
	Germinación	Floración	Fructificación			
<b>Altamente Resistente</b>						
Trigo primavera	-9	-10	-1	-1	-2	-4
Avena	-8	-9	-1	-2	-2	-4
Cebada	-7	-8	-1	-2	-2	-4
Chicharo	-7	-8	-2	-3	-3	-4
Lenteja	-7	-8	-2	-3	-2	-4
<b>Resistente</b>						
Girasol	-4	-6	-2	-3	-3	-4
Cartamo	-4	-6	-2	-3	-3	-4
Zanahoria	-6	-7	-	-	-	-
<b>Medianamente Resistente</b>						
Repollo	-5	-7	-2	-3	-6	-9
Soja	-3	-4	-2	-3	-2	-3
<b>Escasamente Resistente</b>						
<b>Maíz</b>	-2	-3	-1	-2	-2	-3
Sorgo	-2	-3	-1	-2	-2	-3
Papa	-2	-3	-1	-2	-1	-2
<b>No Resistente</b>						
Melón	-0.5	-1	-0.5	-1	-0.5	-1
Arroz	-0.5	-1	-0.5	-1	-	-
Tomate	0	-1	0	-1	0	-1
Tabaco	0	-1	0	-1	0	-1

### 3.3. Aspectos agroclimatológicos relacionados al cultivo del maíz.

---

#### 3.3.3. Estación de Crecimiento y Probable Estación de Crecimiento

Una de las dificultades en la determinación del mejor intervalo de temperaturas para un cultivo dado es que cada etapa de desarrollo (o fenológica), frecuentemente tiene sus requerimientos propios de temperatura que son únicos. Sin embargo, existen condiciones mínimas de temperatura para que un cultivo se desarrolle completamente sin ser afectado por fenómenos meteorológicos extremos, como la incidencia de heladas. De esta manera, Day (1911) citado por Grassi *et al.* (1986), utiliza el término *Estación de crecimiento*, para definir el número de días entre la última helada que mata a las plantas en primavera y la primera helada que mata a las plantas en otoño. Mientras que Reed (1911), también citado por Grassi *et al.* (1986), considera a la componente de probabilidad de ocurrencia de la última y primera helada, definiendo a la *probable estación de crecimiento* como el periodo comprendido entre la fecha con razonable seguridad en primavera y la fecha con razonable seguridad en otoño con condiciones óptimas de temperatura para el desarrollo de algunas plantas.

En el caso del maíz, una helada después de la siembra cuando han aparecido las primeras hojas puede causar daños a estas, pudiendo este daño no extenderse al meristemo por encontrarse aún bajo el nivel del suelo; de esta forma, con eliminar las hojas dañadas la plántula sigue su crecimiento. En caso de heladas muy severas que ocasionan la muerte de la mayoría de la población de las plantas, el agricultor tiene la oportunidad de volver a practicar la siembra con variedades o especies de mayor precosidad. Por esto, el riesgo máximo de primeras heladas al cual se expone un cultivo puede resultar considerable, todo depende de la importancia económica del mismo, de la resistencia que presenta a las heladas, del periodo necesario para completar su ciclo vegetativo y de las alternativas para establecer otras especies en caso de daño total. En base en lo anterior y en la información de las fechas en que siembran los productores, se infiere que **el riesgo máximo de últimas heladas es del orden del 20 %**; es decir, sembrar en la fecha después de la cual se espera la última helada con una probabilidad no mayor a perder el cultivo en uno de cada cinco años.

Contrariamente al caso anterior, las primeras heladas que afectan al cultivo en su fase de llenado de grano, pueden ocasionar daños irreversibles al mismo, por otra parte, el agricultor ya no tienen ninguna oportunidad de siembra y esto puede lesionar más su economía. Por esto, el riesgo máximo al cual puede ser expuesto el cultivo debe ser menor que en el caso de las últimas heladas. Tomando en cuenta lo anterior, la época de madurez de los cultivos, de acuerdo con su fecha de siembra y ciclo vegetativo, se infiere que **el riesgo máximo de primeras heladas no debe ser mayor al 10 %**; es decir, aceptar el hecho de que en un año de cada diez, el cultivo se verá afectado por las primeras heladas en su fase de llenado de grano (Grassi *et al.*, 1986).

### 3.3. Aspectos agroclimatológicos relacionados al cultivo del maíz.

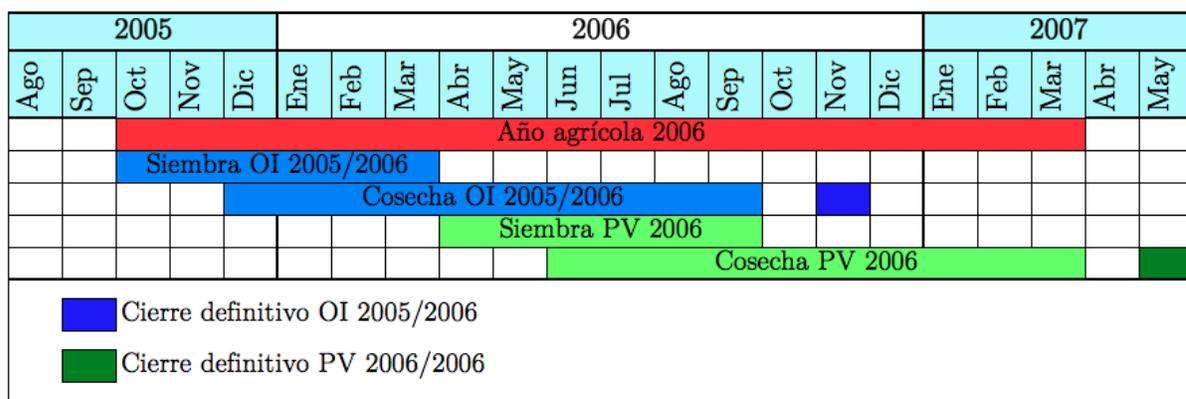
#### 3.3.4. Producción y Estacionalidad del cultivo del maíz

En el Estado de México durante el 2014, se sembraron 541,671.7 ha de maíz en 123 municipios, reportando siniestradas el 4.7 %, se obtuvo una producción de 1,856,138 t de grano, lo que representa el 7.98 % de la producción nacional, ocupando el cuarto lugar después de Sinaloa, Jalisco y Michoacán. Con un precio medio rural (PMR) de \$3,147.38/t aportó el 8.06 % del valor de la producción nacional, posicionando al estado en el tercer lugar después de Michoacán. El rendimiento medio estatal (3.6 t/ha) superó al nacional (3.3 t/ha) y se registró un ingreso promedio de \$11,330/ha (Cuadro 3.3) (SIAP (2016)).

**Cuadro 3.3:** Producción de Maíz en el Estado de México en el 2014.

	Temporal	Riego	Total Estatal	Total Nacional
Sup. Sembrada (Ha)	456,481.4	85,190.3	541,671.7	7,426,412.2
	84.3 %	15.7 %	100 %	
Sup. Cosechada (Ha)	437,067.9	79,145.6	516,213.49	7,060,274.7
	84.7 %	15.3 %	100 %	
Sup. Siniestrada (Ha)	19,413.6	6,044.7	25,458.3	366,137.5
	76.3 %	23.7 %	100 %	
Producción (t)	1,491,028.5	365,109.6	1,856,138.1	23,273,256.5
	80.3 %	19.7 %	100 %	
Rendimiento (t/Ha)	3.41	4.61	3.6*	3.3
PMR (\$/t)	3,194.2	2,956.2	3147.38*	3,115.96
Valor de la Producción (x \$1,000)	4,762,640.2	1,079,327.3	5,841,967.5	72,518,448.8

De acuerdo con el SIAP (2016), durante el ciclo de Primavera-Verano (PV) 2014, se obtuvo el 99.93 % de la producción estatal, y el 0.07 % en el ciclo Otoño-Invierno (O-I). La Figura 3.2 muestra las fechas de siembra, cosecha y el cierre definitivo de cada ciclo.



**Figura 3.2:** Calendario Agrícola 2006. (SIAP, 2010)

## 3.4. Teoría de Valores Extremos

La Teoría de los Valores Extremos (TVE), trata con el comportamiento estocástico del máximo y el mínimo de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas. Las propiedades distribucionales de valores extremos (máximo y mínimo), las estadísticas de orden, extremos e intermedios, y los excedentes sobre (bajo) un umbral alto (bajo) que se determinan por las colas superior e inferior de la distribución subyacente ([Kotz y Nadarajah, 2000](#)).

El punto de partida es el estudio de la convergencia débil para el máximo muestral de una secuencia de variables aleatorias  $X_n$  con función de distribución  $F$ . Nuestra intención es usar la distribución límite de este estadístico para derivar la convergencia débil de las observaciones más grandes de una secuencia aleatoria bajo el menor número posible de supuestos sobre la distribución  $F$ .

### 3.4.1. Antecedentes y aplicaciones

Una breve reseña del desarrollo y aplicaciones de la TVE es dada por [Castillo \(1988\)](#):

Uno de los resultados centrales, que más influencia ha tenido sobre el desarrollo de la TVE, fue la demostración, por Fréchet (1927) y Fisher y Tippett (1928), de que sólo son posibles tres familias paramétricas de distribuciones límites para máximos y sus equivalentes para mínimos. Posteriormente, resurge el problema de la influencia del tamaño en la resistencia y se pone de moda, dando lugar a trabajos muy interesantes como los de Peirce (1926), Peterson (1930), Weibull (1939), Afanasév (1940), Kontorova (1940, 1943), Gillet (1940), Tucker (1941, 1945), Gurney (1945, 1947), Fowler (1945), Gurney y Pearson (1947), Daniels (1945), Epstein (1948), Epstein y Hamilton (1948), entre otros.

Importantes contribuciones fueron también los trabajos de Finetti (1932), Gumbel (1934, 1935a, b), Mises (193b) y Rice (1939), que abordaron el problema de la distribución de los extremos: máximo y mínimo de una muestra, y que culminaron con la prueba en forma general, por Gnedenko (1943), del teorema de los tipos de extremos. A partir de entonces se publican multitud de trabajos, la mayor parte relacionados con aplicaciones, hasta que aparece el libro “Statistics of extremes” de Gumbel (1958), que supone otro de los hitos más importantes en la historia de la estadística de los valores extremos.

Las contribuciones más importantes de los 25 años siguientes, entre las que destacan las contribuciones al caso de dependencia y los resultados referentes al caso multivariado, han sido recogidas por Galambos (1978) y Leadbetter (1983). De ahí al momento actual surgen infinidad de contribuciones al tema de extremos cuya descripción exhaustiva sale fuera del objeto de este trabajo. Para referencias bibliográficas sobre el tema consultar Galambos (1978, 1987), Harter (1978a, b), Leadbetter *et al.* (1983) o Castillo (1988).

### 3.4. Teoría de Valores Extremos

---

Una de las razones fundamentales del éxito y desarrollo logrado por la estadística de valores extremos es su relación con el diseño y proyecto en ingeniería. En esta especialidad, el diseño viene casi siempre condicionado por los extremos (máximos, mínimos o estadísticos de orden próximo). Así, una estructura de edificación debe diseñarse para resistir las máximas cargas, los máximos vientos, los máximos gradientes de temperatura y los máximos terremotos, una obra de protección contra riadas se proyecta para soportar los máximos caudales, un embalse para abastecimiento de agua a un núcleo urbano se diseña para dar servicio bajo las condiciones peores de sequía, un dique se proyecta para resistir las olas mayores, etc.

Por ello, algunas especialidades ingenieriles, como la Meteorología, la Ingeniería Estructural, la Ingeniería Oceanográfica, la Ingeniería Hidráulica, la Resistencia de Materiales, la Ingeniería Eléctrica, la Ingeniería de Tráfico, etc. dependen inevitablemente de la estadística de valores extremos.

Particularmente, las condiciones meteorológicas extremas son conocidas por influir en muchos aspectos de la vida humana, la agricultura y de los animales, el comportamiento de algunas máquinas, y la vida útil de ciertos materiales. En todos estos casos, los ingenieros, en lugar de centrar el interés en los valores medios (temperatura, precipitaciones, etc.), están preocupados sólo con la ocurrencia de eventos extremos (temperatura muy alta o muy baja, la lluvia, etc.). La predicción exacta de las probabilidades de los sucesos raros de este modo se convierte en el objetivo del análisis. Para discusiones relacionadas, el lector puede referirse a Ferro y Segers (2003), Galambos y Macri (2002), Leadbetter, Lindgren y Rootzkn (1983), y Sneyers (1984).

#### 3.4.2. Distribuciones límites del máximo y mínimo

La TVE clásica, se centra en el análisis del comportamiento del estadístico de

$$M_n = \max\{X_1, \dots, X_n\} \quad (3.1)$$

Donde  $X_1, \dots, X_n$  es una secuencia de variables aleatorias independientes que tienen una función de distribución común  $F$ . En la práctica, el  $X_i$  generalmente representa valores de un proceso medido en una escala de tiempo regular, tal que  $M_n$  representa la observación máxima del proceso en  $n$  unidades de tiempo. Los extremos son definidos como el máximo  $y_n = \max\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  y el mínimo  $y_1 = \min\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . Donde sus distribuciones respectivas están dadas respectivamente por:

### 3.4. Teoría de Valores Extremos

---

$$\begin{aligned}
 H_n(x) = P(Y_n \leq x) &= P(X_1 \leq x, X_2 \leq x, \dots, X_n \leq x) \\
 &= P(X_1 \leq x), P(X_2 \leq x), \dots, P(X_n \leq x) \\
 &= \prod_{i=1}^n P(X_i \leq x) \\
 &= [F(x)]^n
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}
 L_n(x) = P(Y_1 \leq x) &= 1 - P(Y_1 > x) \\
 &= 1 - P(X_1 > x, X_2 > x, \dots, X_n > x) \\
 &= 1 - P(X_1 > x), P(X_2 > x), \dots, P(X_n > x) \\
 &= 1 - \prod_{i=1}^n P(X_i > x) \\
 &= 1 - [1 - F(x)]^n
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Donde la función de distribución  $F(x)$  es desconocida, una opción es realizar una estimación a partir de los datos observados, sin embargo, una pequeña discrepancia en la estimación de  $F(x)$  puede ser sustancial para  $[F(x)]^n$ . Por lo tanto, un enfoque alternativo es aceptar  $F(x)$  desconocida y buscar una familia de modelos para  $[F(x)]^n$ , el cual puede estimarse mediante un enfoque análogo al Teorema Central del Límite pero usando únicamente los datos extremos. Cuando  $n$  tiende a infinito, tenemos que:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} H_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} [F(x)]^n = \begin{cases} 1, & \text{si } F(x) = 1, \\ 0, & \text{si } F(x) < 1. \end{cases} \tag{3.4}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} L_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} 1 - [1 - F(x)]^n = \begin{cases} 0, & \text{si } F(x) = 0, \\ 1, & \text{si } F(x) > 0. \end{cases} \tag{3.5}$$

Esto significa que las distribuciones límite 3.4 y 3.5 son degeneradas (únicamente toma valores 0 y 1). Para evitar esto, se buscan transformaciones lineales tales que el límite de las distribuciones sean no degeneradas,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} H_n(a_n + b_n x) = \lim_{n \rightarrow \infty} [F(a_n + b_n x)]^n = H(x), \quad \forall x \tag{3.6}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} L_n(c_n + d_n x) = \lim_{n \rightarrow \infty} 1 - [1 - F(c_n + d_n x)]^n = L(x), \quad \forall x \tag{3.7}$$

### 3.4. Teoría de Valores Extremos

---

donde  $a_n, c_n \in \mathbb{R}$ , son las constantes de traslación y  $b_n$ , y  $d_n > 0$  son constantes de escala, todas dependientes de  $n$ . Donde la función de densidad del máximo se mueve hacia la derecha y puede cambiar la pendiente a medida que  $n$  incrementa para dos constantes fijas, y conservando la forma de  $H(x)$ . Cuando esto es posible y se cumple 3.6 y 3.7, se dice que  $F(x)$  pertenece al *Dominio de atracción* de la respectiva distribución límite.

Nótese que se supone que  $H(x)$  y  $L(x)$  son continuas y por ello, 3.6 y 3.7 son equivalentes a la convergencia débil (Castillo, 1988) o convergencia en distribución.

#### 3.4.3. Distribución de Valores Extremos (DVE): Fisher-Tippett, Gnedenko

Las únicas distribuciones de máximos no degeneradas que cumplen la condición 3.6 se definen en el Teorema de Fisher y Tippett (1928), Gnedenko (1943):

**Teorema 3.1** Sean  $x_1, x_2, \dots, x_n$  v.a.'s i.i.d., con función de distribución  $F$ . Sea el máximo de las observaciones  $M_n = \max\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . Si existen secuencias de constantes  $\{a_n > 0\}$  y  $\{b_n\}$  tales que:

$$\Pr\left(\frac{M_n - b_n}{a_n} \leq x\right) \rightarrow H(x), \text{ cuando } n \rightarrow \infty$$

Donde  $H$  es una función de distribución no degenerada, entonces  $H$  pertenece a una de las siguientes familias:

$$\begin{aligned} I : \text{Gumbel } H(x) &= \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x-b}{a}\right)\right]\right\}, -\infty < x < \infty \\ II : \text{Frechet } H(x) &= \begin{cases} 0, & x \leq b, \\ \exp\left\{-\left(\frac{x-b}{a}\right)^{-\gamma}\right\}, & x > b \end{cases} \\ III : \text{Weibull } H(x) &= \begin{cases} \exp\left\{-\left[\left(\frac{x-b}{a}\right)^\gamma\right]\right\}, & x < b, \\ 1, & \geq b \end{cases} \end{aligned}$$

para los parámetros  $a > 0$ ,  $b$  y, en el caso de las familias II y III,  $\alpha > 0$ . El parámetro  $\gamma$  es llamado el índice de valor extremo (de Haan y Ferreira, 2006) o índice de cola.

Las tres distribuciones mencionadas en el Teorema 3.1 conforman la familia de Distribuciones de Valores Extremos.

#### 3.4.4. Distribución Generalizada de Valores Extremos (DGVE). Condición de Jenkinson-von Misses

Von Mises (1936) y Jenkinson (1955), derivaron cada uno por su lado, la distribución particular que unifica las tres distribuciones límites de valores extremos. Ellos mostraron que la función de distribución límite forman una familia explícita de un parámetro  $\xi$ .

Considérese la siguiente parametrización:  $\gamma = \frac{1}{\xi}$ ,  $\mu = b$  y  $\sigma = a$ , entonces.

$$H(x) = \exp \begin{cases} \exp - [1 + \xi (\frac{x - \mu}{\sigma})]^{-\frac{1}{\xi}} & \text{para } \xi \neq 0, \quad +\xi (\frac{x - \mu}{\sigma}) > 0. \\ -\exp [ - (\frac{x - \mu}{\sigma}) ] & \text{para } \xi = 0, \end{cases} \quad (3.8)$$

Donde:  $\mu =$  es el parámetro de localidad,  $\sigma =$  el parámetro de escala, y  $\xi =$  el parámetro de forma.

A esta familia se le conoce como la familia de distribuciones de Distribución Generalizada de Valores Extremos ( $DGVE_M$ ) para máximos, también es conocida como la distribución de valores extremos tipo Von Misses-Jenkinson (para máximos). El parámetro  $\xi$  es la más importante, ya que éste determina el comportamiento de la cola de la distribución de los datos: cuando  $\xi = 0$  se tienen la distribución Gumbel, cuando  $\xi < 0$  la distribución Weibull y cuando  $\xi > 0$  se obtiene la distribución Frechet.

La teoría de valores extremos máximos puede ser aplicada en el análisis de mínimos, mediante la siguiente transformación  $\min(x_1, x_2, \dots, x_n) = -\max(-x_1, -x_2, \dots, -x_n)$  de  $n$  variables aleatorias (de Haan y Ferreira, 2006).

**Teorema 3.2** (Obteniendo la  $DGVE_m$  de la  $DGVE_M$ ) Si una variable aleatoria  $X \sim DGVE_M(\mu, \sigma, \xi)$ , entonces,  $Y = -X \sim DGVE_m(\mu, \sigma, \xi)$  y si la variable aleatoria  $X \sim DGVE_m(\mu, \sigma, \xi)$ , entonces,  $Y = -X \sim DGVE_M(\mu, \sigma, \xi)$ .

La demostración del Teorema 3.2 así como las funciones de la DGVE para extremos máximos y mínimos, es desarrollada detalladamente por Castillo *et al.* (2005).

#### 3.4.5. Distribución Generalizada de Pareto

Si el interés del análisis es modelar los excesos de una variable sobre un umbral dado, entonces se usa en Método de Picos sobre umbrales (POT), el cual se basa en el siguiente Teorema:

**Teorema 3.3 (Pickands-Balkema. De Haan)** *Sea  $(X_1, X_2, \dots)$  una sucesión de v.a.'s i.i.d., y sea  $F_u$  su función de distribución condicional de excesos, entonces, para una gran clase de funciones de distribuciones  $F$ , y umbrales suficientemente grandes  $u$ ,  $F_u$  es bien aproximada por la Distribución de Pareto Generalizada (GPD):*

$$G_{\xi, \beta}(x) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \frac{\xi x}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\beta}} & \text{para } \xi \neq 0, \\ 1 - e^{-\frac{x}{\beta}} & \text{para } \xi = 0 \end{cases}$$

La GPD representa tres diferentes funciones de distribución límites de excesos:  $\xi > 0$ , Pareto con soporte  $x \geq 0$ ,  $\xi = 0$  exponencial con soporte  $x \geq 0$ , y  $\xi < 0$  Pareto con soporte  $0 \leq x \leq \frac{-\beta}{\xi}$ .

#### 3.4.6. Método de Picos sobre umbrales (POT)

Dado que se desean modelar las temperaturas mínimas inferiores a un umbral  $u$  se utiliza el Método POT. De la aplicación de este método surgen tres cuestiones a resolver:

1. Determinar el nivel del umbral  $u$ , cuya elección está sujeta al problema de la varianza y el sesgo.
2. Determinar qué función de distribución ajusta dichos excesos. Se trata de una distribución condicionada a que el extremo haya superado  $u$ .

$$F^u = F^u(y + u) = P(X - u \leq y | X > u) = \frac{F(x) - F(u)}{1 - F(u)}$$

3. Consecuencia de la segunda, es la función de supervivencia, complementaria de la función de distribución

$$1 - F^u = 1 - F^u(y + u) = \frac{1 - F(y + u)}{1 - F(u)}, 0 \leq x \leq x_0$$

# Capítulo 4

## METODOLOGIA

### 4.1. Área de Estudio

El área de estudio se localiza en la Región Centro del país, que incluye el Estado de México y las regiones de los estados vecinos que colindan con sus límites territoriales. Este trabajo se enfoca principalmente en las regiones agrícolas, especialmente aquellas destinadas a la producción de maíz.

El Estado de México se ubica en la región Centro Sur de la República, forma parte de las provincias Eje Neo Volcánico y Sierra Madre del Sur. El clima predominante es templado subhúmedo, que caracteriza el 73 % del estado, localizado en los valles altos del norte, centro y este; el 21 % es cálido subhúmedo y se encuentra hacia el suroeste, el 6 % seco y semiseco, presente en el noreste, y 0.16 % clima frío, localizado en las partes altas de los volcanes. La temperatura media anual es de 14.7°C, las temperaturas más bajas se presentan en los meses de enero y febrero, oscilan alrededor de 3.0°C. La temperatura máxima promedio se presenta en abril y mayo es alrededor de 25°C. En el Nevado de Toluca (Alberge, Estación de Microondas), se registra una temperatura media anual de 3.9°C, que es la más baja de todo el país. Las lluvias se presentan durante el verano en los meses de junio a septiembre, la precipitación media anual oscila entre 500 y 1,500 mm con una media de 900 mm.

En el estado se practica la agricultura de riego y de temporal siendo los principales cultivos: maíz, chícharo verde, cebada, frijol, papa, alfalfa, trigo, aguacate y guayaba entre otros ([INEGI, 2016](#)).

## 4.2. Base de Datos

La información utilizada en este análisis fue tomada de la base de datos climáticos diarios [CLICOM \(2015\)](#) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Se extrajo una base de datos, conformada únicamente por las temperaturas mínimas diarias registradas entre los años 1980 y 2010 en todas las estaciones meteorológicas localizadas dentro del estado de México, el Distrito Federal y los ocho estados colindantes.

La edición de la base de datos, se realizó mediante la depuración de aquellas estaciones que no cumplan con la condición de contar con al menos el 80 % de datos diarios durante los 31 años observados, es decir, entre 24.8 y 31 años (no necesariamente continuos) con datos, quedando seleccionadas 481 estaciones. Una segunda condición, fue seleccionar estaciones que cuentan con registros de al menos 8 años con presencia de heladas durante el periodo observado, ya que se requieren datos suficientes para realizar los análisis probabilísticos intensidad y ocurrencia, resultando 236 estaciones seleccionadas (Cuadro 4.1).

**Cuadro 4.1:** Estaciones seleccionadas por Estado

#	ID	Estado	Est. con datos(80 %)	Est. Seleccionadas
1	09	Distrito Federal	5	2
2	11	Guanajuato	90	49
3	12	Guerrero	76	0
4	13	Hidalgo	54	41
5	15	Estado de México	105	77
6	16	Michoacán	43	16
7	17	Morelos	40	3
8	21	Puebla	32	21
9	22	Querétaro	19	10
10	29	Tlaxcala	17	17
		<b>TOTAL</b>	<b>481</b>	<b>236</b>

Para cada estación se elabora una matriz:

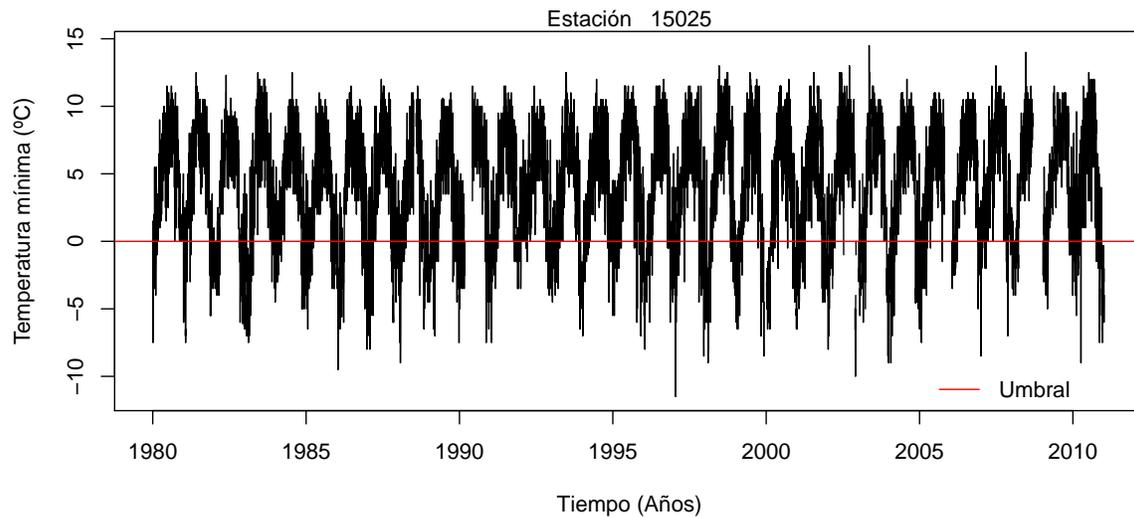
$$A_{(ij)k} = a_{(ij)k} \quad (4.1)$$

Donde:  $i = 1, \dots, 366$ , denota el día juliano del año,  $j = 1, \dots, 31$  es el número del año observado, y  $k = 1, \dots, 236$  se refiera a la k-esima estación meteorológica. Así, cada columna contiene las temperaturas mínimas ( $T_{min}$ ) diarias de j-ésimo año. Los datos faltantes, fueron reemplazados por la expresión "NA".

## 4.3. Sistematización de datos

### 4.3.1. Selección del umbral

El umbral fue seleccionado con base en la Definición 3.1, de esta manera, se definió la ocurrencia de una helada cuando la temperatura mínima ( $T_{min}$ ) es menor o igual a un umbral de  $0^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 4.1:** Serie de temperaturas mínimas en Ejido de Llano Grande, Jipilco, Méx.

### 4.3.2. Selección del variables

Dado que el objetivo es modelar la ocurrencia de las heladas tardías y tempranas, así como su intensidad, se requiere obtener la serie de datos anuales por estación de las fechas de la última y la primera helada, así como la magnitud de la temperatura mínima registrada en cada evento.

Para el primer caso, se requiere analizar una respuesta binaria: “Ocurrió” o “No ocurrió”. Por lo tanto, se realizó la siguiente transformación a la matriz 4.1:

$$X_{(ij)k} = x_{(ij)k} = \begin{cases} 0, & \text{cuando } T_{min} > 0 \rightarrow \text{No Ocurrencia de helada} \\ 1, & \text{cuando } T_{min} \leq 0 \rightarrow \text{Ocurrencia de helada} \end{cases} \quad (4.2)$$

### 4.3. Sistematización de datos

---

Para analizar las fechas extremas de ocurrencia de las heladas, se convirtieron estas fechas a días julianos ya que éstos se pueden expresar fácilmente como una variable continua que mide el tiempo de arribo (en días) ya sea de la última o la primera helada partiendo desde el primer día del año. Con base en el trabajo de Grassi *et al.* (1986) se asumió que el día juliano 183 (1 de julio) siempre se encuentra dentro del periodo libre de heladas, consecuentemente, se obtuvieron dos conjuntos de datos: fechas de ocurrencia de ultimas heladas y fechas de ocurrencia de las primeras heladas, por lo que cada conjunto fue analizado por separado, al tratarse de diferentes eventos.

De acuerdo a las definiciones 3.2 y 3.3, se registraron las fechas de la Última Helada (UH), la Primera Helada (PH) y el Periodo Libre de Heladas (PLH) en el año  $j$  de las  $k$  estaciones meteorológicas.

$$\begin{aligned}UH_{(j)k} &= \max\{i : x_{(ij)k} = 1\}, \text{ para } 1 < i < 183 \\PH_{(j)k} &= \min\{i : x_{(ij)k} = 1\}, \text{ para } 183 \leq i < 366 \\PLH_{(j)k} &= PH_j - UH_j - 1\end{aligned}$$

Adicionalmente, se reportó la temperatura mínima registrada tanto en la primera como en la última helada de cada año en las  $k$  estaciones.

$$\begin{aligned}T_{\min}PH_{(j)k} &= a_{(ij)k}, \text{ para } i = UH_{(j)k} \\T_{\min}UH_{(j)k} &= a_{(ij)k}, \text{ para } i = PH_{(j)k}\end{aligned}$$

De esta manera, para cada estación se obtuvieron dichos datos y se se elaboró un cuadro de registro de las fechas de ocurrencia de la primera y ultima helada, así como su temperatura mínima, como se ejemplifica en los Cuadros 4.2 y 4.5. Es importante resaltar que no todas las estaciones cuentan con información completa, ya sea porque presentan hasta un 20 % de datos faltantes, o por que no se presentó el fenómeno heladas.

#### 4.3.3. Selección de Estaciones Meteorológicas

Con base en los cuadros de registro, se realizó un conteo del número de eventos registrados en la primera y en la última helada en cada una de las estaciones. Se seleccionaron las estaciones que cuentan en ambos casos (primera y última helada), con un número de eventos registrados mayor o igual a ocho, ya que una cantidad menor de datos presenta problemas en el ajuste de la distribución teórica y en la estimación de parámetros. De esta manera, resultaron seleccionadas 236 estaciones.

#### 4.4. Análisis de ocurrencia de heladas

**Cuadro 4.2:** Fechas de ocurrencia y temperaturas de la última y primera helada. Estación 15010. Atotonilco, Almoloya de Juárez, Méx.

Año	Última Helada (UH)			Primera Helada (PH)			PLH
	Día Juliano	Fecha	Temp. (°C)	Día Juliano	Fecha	Temp. (°C)	
1980	61	1-Mar	0	318	13-Nov	-2.4	256
1981	83	24-Mar	0	315	11-Nov	0	231
1982	68	9-Mar	-0.2	309	5-Nov	-3	240
1983	118	28-Apr	-0.4	323	19-Nov	-1	204
1984	105	14-Apr	-0.6	315	10-Nov	-2.1	209
1985	56	25-Feb	-0.1	308	4-Nov	0	251
1986	95	5-Apr	0	300	27-Oct	-1.5	204
1987	89	30-Mar	0	289	16-Oct	-2	199
1988	111	20-Apr	-0.3	307	2-Nov	-2.6	195
1989	129	9-May	0	345	11-Dec	0	215
1990	81	22-Mar	0	315	11-Nov	-1.5	233
1991	90	31-Mar	0	313	9-Nov	-5	222
1992	112	21-Apr	0	326	21-Nov	0	213
1993	-	-	-	-	-	-	365
1994	-	-	-	348	14-Dec	0	347
1995	101	11-Apr	-1.3	282	9-Oct	-0.5	180
1996	100	9-Apr	-1.6	314	9-Nov	-2.2	213
1997	120	30-Apr	-0.5	291	18-Oct	-1	170
1998	124	4-May	0	-	-	-	241
1999	75	16-Mar	-0.1	296	23-Oct	-2	220
2000	109	18-Apr	0	314	9-Nov	0	204
2001	90	31-Mar	0	294	21-Oct	0	203
2002	37	6-Feb	0	321	17-Nov	-4	283
2003	122	2-May	0	310	6-Nov	-1	187
2004	95	4-Apr	0	311	6-Nov	-2	215
2005	129	9-May	0	266	23-Sep	0	136
2006	106	16-Apr	0	302	29-Oct	-1	195
2007	153	2-Jun	0	268	25-Sep	0	114
2008	101	10-Apr	0	275	1-Oct	0	173
2009	122	2-May	0	310	6-Nov	-2	187
2010	128	8-May	0	273	30-Sep	-1	144

#### 4.4. Análisis de ocurrencia de heladas

Para tener una idea general de la frecuencia y distribución de las heladas a lo largo del año, así como las fechas extremas en que éstas se presentaron, partiendo de la matriz binaria expresada en la Ecuación 4.2 se elaboraron gráficos de Fechas de Ocurrencia para

#### 4.4. Análisis de ocurrencia de heladas

cada una de las estaciones seleccionadas, un ejemplo se muestra en las Figuras 4.2 y 4.3. Considerando los meses de siembra y cosecha como épocas críticas, se puede observar la proporción de heladas que ocurren en fechas extremas y que pueden poner en riesgo a los cultivos en etapas tempranas tardías de su desarrollo.

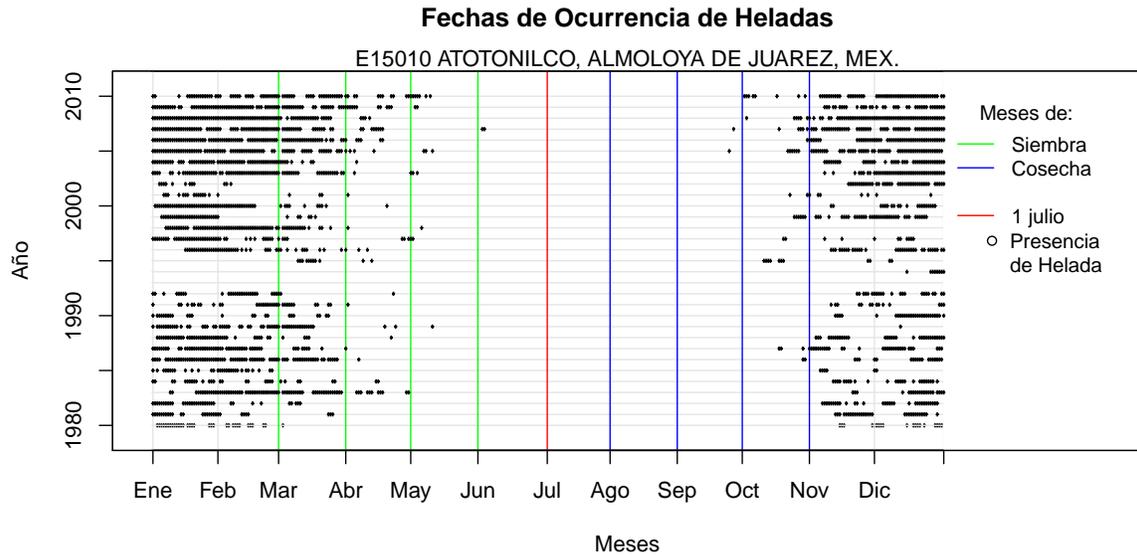


Figura 4.2: Distribución de las Fechas de ocurrencia de heladas: Almoloya de Juárez, México

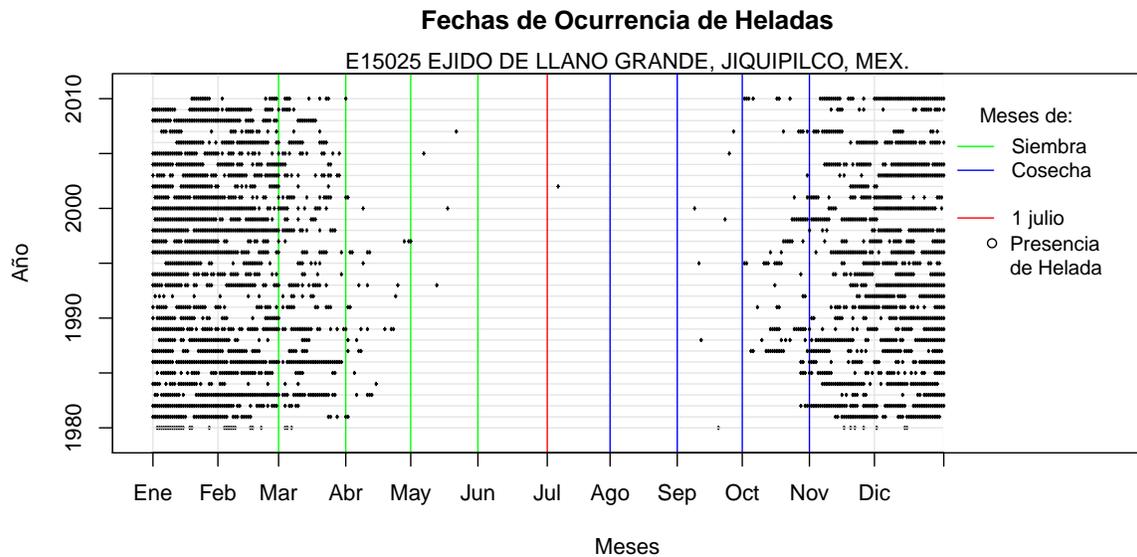


Figura 4.3: Distribución de las fechas de ocurrencia de heladas: Jipilco, México

## 4.4. Análisis de ocurrencia de heladas

---

### 4.4.1. Método de Thom (1959)

De acuerdo con Thom 1959, el modelo para determinar la probabilidad de heladas puede expresarse como la mezcla de dos distribuciones: una distribución discreta de respuesta binaria (helada, no helada) y una distribución continua de las fechas de ocurrencia considerando únicamente los años con heladas. La función de distribución mixta de heladas y no heladas en primavera, puede ser derivada a partir de lo siguiente: Sea  $q_s$ =Probabilidad de no helada en primavera,  $p_s$ = Probabilidad de helada en primavera.

$$G(x) = q_s + p_s * F_S(x) \quad (4.3)$$

Donde  $F_S(x)$  es la función de distribución de las fechas de ocurrencia de las últimas heladas en primavera, y da la probabilidad de ocurrencia de helada antes de la fecha  $x$ , sin embargo, para fines de prevención de riesgos, interesa conocer la probabilidad de heladas después de dicha fecha, por lo tanto se considera:  $H(x) = 1 - G(x)$ , entonces  $H(x) = 1 - q_s + p_s F(x)$  y dado que  $p_s + q_s = 1$ , se tiene que la función de distribución de las últimas heladas o heladas primaverales es:

$$H(x) = p_s[1 - F_S(x)] \quad (4.4)$$

Del mismo modo, se obtienen la función de distribución de probabilidad de ocurrencia de las primeras heladas o heladas otoñales, que calcula la probabilidad de ocurrencia antes de la fecha  $x$

$$J(x) = p_a F_A(x) \quad (4.5)$$

Donde  $p_a$  es la probabilidad de helada en otoño y  $F_A(x)$  es la función de distribución de las fechas de ocurrencia de las primeras heladas en otoño. Debe notarse que las ecuaciones 4.4 y 4.5 se mantienen generalmente, para la situación que ocurren heladas todos los años, es decir,  $q = 0$  y  $p = 1$ .

La primera estimación de  $H$  y  $J$  es empírica, e implica la primera estimación de  $F_S$  y  $F_A$ , la cual podría ser obtenida mediante la Ecuación 4.6, donde  $k$  es el número de orden, y  $m_i$  es el número de años con heladas en primavera u otoño. Se ha encontrado que, para distribuciones continuas, ésta ecuación proporciona estimaciones más insesgadas en las probabilidades pequeñas y grandes. Así mismo, se requieren las estimaciones de  $p_s$  y  $p_a$ , que pueden obtenerse usando la ecuación 4.7, donde  $m_i$  es el número de años con heladas en el periodo  $i$ , y  $n$  es el número total de años de la serie. Note que  $F_i^*$  es una estimación no paramétrica y  $\hat{p}_i$ , una estimación paramétrica.

$$F_i^* = k/(m_i + 1), i = \{S, A\} \quad (4.6)$$

$$(\hat{p}_i) = m_i/n, i = \{s, a\} \quad (4.7)$$

#### 4.4. Análisis de ocurrencia de heladas

---

Los estimadores de  $H$  y  $J$  denotados como  $H^*$  y  $J^*$  respectivamente, son no paramétricos y se estiman reemplazando 4.6 y 4.7 en 4.4 y 4.5. Si bien no se recomienda estimar probabilidades con una estimación empírica o no paramétrica, las probabilidades empíricas son necesarias para evaluar el ajuste de la distribución teórica que se proponga como modelo de ajuste a los datos.

La segunda estimación de  $H$  y  $J$  es paramétrica y se denota como  $\hat{H}$  y  $\hat{J}$ , las cuales se obtienen sustituyendo  $\hat{p}_s$  y  $\hat{F}_S$  en 4.4, y  $\hat{p}_a$  y  $\hat{F}_A$  en 4.5, donde  $\hat{F}_S$  y  $\hat{F}_A$  son una estimación paramétrica que corresponde a una función de distribución ajustada a los datos de ocurrencia de heladas. De acuerdo con resultados de Reed (1916) y Thom y Shaw (1958.) la distribución normal ajusta satisfactoriamente a los datos de fechas de heladas bajo un amplio rango de condiciones, para 0°C y otros valores de temperaturas con series completas.

Sin embargo, mediante un análisis exploratorio de los datos, se observó que en México la mayoría de las estaciones no cuenta con información suficiente para tener series de completas, además, se observó cierta asimetría en la distribución de las fechas de ocurrencia de las primeras y últimas heladas, lo que sugiere explorar el ajuste de otras funciones de distribución diferentes a la normal.

Considerando que las fechas de ocurrencia de la primera y última helada son siempre valores extremos, es razonable proponer alguna de las distribuciones de valores extremos, ya que éstas presentan mayor sensibilidad en el análisis de las colas de una distribución, esto permite obtener resultados con mayor confiabilidad en los estudios de análisis de riesgos. Se propuso la distribución Weibull, y adicionalmente se comparó con la distribución normal otras dos distribuciones continuas como de detalla más adelante.

En el caso particular de este estudio, se definieron niveles de riesgo máximos admisibles, que permiten realizar una estimación confiable de las fechas de ocurrencia de la última y la primera helada, lo cual resulta más eficiente que estimar las fechas media de una helada temprana o tardía, ya que éstas implican hasta un 50 % de riesgo de impacto de heladas.

### 4.4.2. Funciones de distribución propuestas para ajustar a los datos

Con base en la distribución empírica observada de los datos de fechas extremas de ocurrencia de heladas tardías y tempranas, se propuso probar el ajuste de cuatro distribuciones teóricas a saber: Gamma, Log-Normal, Normal y Weibull, cuyas funciones de densidad de probabilidad son las siguientes:

- Distribución Gamma

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} \exp\left\{-\frac{x}{\beta}\right\} I_{(-\infty, \infty)}(x), \quad \alpha, \beta > 0$$

- Distribución Log-Normal

$$f(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}(\log x - \mu)^2\right\} I_{(0, \infty)}(x), \quad \mu \in \mathbb{R}, \sigma > 0$$

- Distribución Normal

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}(x - \mu)^2\right\} I_{(-\infty, \infty)}(x), \quad \mu \in \mathbb{R}, \sigma > 0$$

- Distribución Weibull,

$$f(x; \lambda, \beta) = \beta\lambda^\beta x^{\beta-1} \exp\{-(\lambda x)^\beta\} I_{(0, \infty)}(x), \quad \beta > 0, \lambda > 1$$

### 4.4.3. Estimación de parámetros

El método de estimación de parámetros utilizado fue el de Máxima Verosimilitud, puesto que si éstos estimadores existen, y bajo ciertas condiciones de regularidad, poseen propiedades altamente deseables, ya que son consistentes, eficientes, suficientes e insesgados.

Si  $x_1, x_2, \dots, x_n$  son una muestra aleatoria independiente e idénticamente distribuida de una población con una función de distribución de probabilidad  $f(x | \theta_1, \dots, \theta_k)$ , la función de verosimilitud esta definida por la Ecuación 4.8, la cual en caso de ser diferenciable en  $\theta_i$ , permite calcular los estimadores de máxima verosimilitud (MLE) para el parametro  $\theta$  mediante la solución de la Ecuación 4.9. Usar el logaritmo de la función de verosimilitud proporciona el mismo resultado y en ocasiones facilita la estimación de  $\theta$ .

$$L(\theta | x) = L(\theta_1, \dots, \theta_k | x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n f(x_i | \theta_1, \dots, \theta_k) \quad (4.8)$$

#### 4.4. Análisis de ocurrencia de heladas

$$\frac{d}{d\theta}L(\theta | x) = 0; \frac{d}{d\theta}\log L(\theta | x) = 0, i = 1, \dots, k. \quad (4.9)$$

El ajuste de las distribuciones propuestas a los datos de las fechas de ocurrencia de heladas y la estimación de parámetros, se realizó mediante el uso de la función `fitdist` del paquete `fitdistrplus` (Delignette-Muller *et al.*, 2010) en el software estadístico R 3.2.4.

La Figura 4.4 muestra gráficamente los ajustes de las cuatro distribuciones a la distribución empírica de los datos de las fechas ocurrencia de las últimas y primeras heladas.

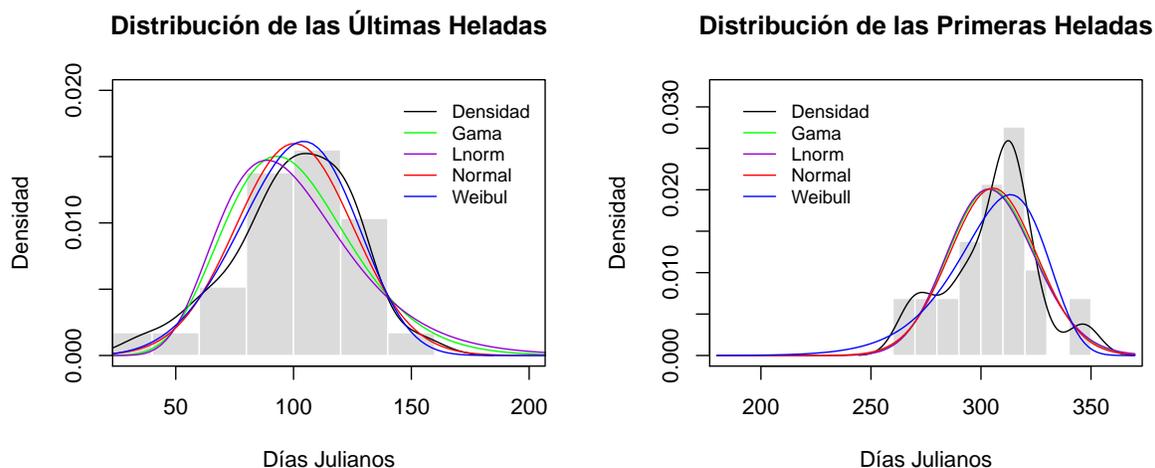


Figura 4.4: Ajuste de Distribuciones Teóricas: Almoloya de Juárez, Méx.

#### 4.4.4. Pruebas de Bondad de Ajuste

Para seleccionar entre las distribuciones probadas aquella que es capaz de modelar la distribución real de los datos con el mejor ajuste a los datos, se realizaron dos pruebas de bondad de ajuste, la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S) y el Criterio de Información de Akaike (AIC), las cuales se describen a continuación:

- a) **Prueba de Kolmogorov-Smirnov.** Considérese la hipótesis nula  $H_0 : F(x) = F_0(x)$ , donde la  $F_0(x)$  se especifica completamente. Denótese por  $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$  a las observaciones ordenadas de una muestra aleatoria de tamaño  $n$  y defínase su función de distribución acumulativa muestral como:

$$S_n(x) = \begin{cases} 0 & x < x_{(1)}, \\ \frac{k}{n} & x_{(k)} \leq x < x_{(k+1)}, \\ 1 & x \geq x_{(n)} \end{cases} \quad (4.10)$$

#### 4.4. Análisis de ocurrencia de heladas

El estadístico de K-S se basa en la diferencia entre la función de distribución acumulada hipotetizada  $F_0(x)$  y la empírica (Ecuación 4.10), y se define como:

$$D_n = \max_x |S_n(x) - F_0(x)| \quad (4.11)$$

Para un tamaño  $\alpha$  del error tipo I, la región crítica es de la forma  $P(D_n > \frac{c}{\sqrt{n}}) = \alpha$ . De acuerdo con lo anterior, la hipótesis  $H_0$  se rechaza si para algún valor  $x$  observado el valor  $D_n$  se encuentra dentro de la region crítica de tamaño  $\alpha$ . La tabla de valores cuantiles superiores de  $D_n$  para varios tamaños de muestra son proporcionados por (Massey Jr, 1951). En la comparación de modelos, se seleccionó aquel con el valor del estadístico  $D$  mas pequeño.

El estadístico de K-S tiene una función de distribución que es independiente del modelo propuesto bajo la hipótesis nula, y que puede evaluarse sólo en función del tamaño de muestra y después usarse para cualquier  $F_0(x)$ . Además, esta prueba tiene la atractiva propiedad de ser aplicable a muestras pequeñas (Canavos, 1988).

- b) **Criterio de Información de Akaike (AIC).** El Criterio de Información de Akaike (AIC) es una manera de seleccionar un modelo a partir de un conjunto de modelos. El modelo elegido es el que minimiza la distancia Kullback-Leibler entre el modelo candidato y el modelo real de los datos. Se basa en la teoría de la información. Una forma heurística de pensarlo es como un criterio que busca un modelo que tiene un buen ajuste al modelo real, pero con el menor número de parámetros (principio de parsimonia). Se define como:

$$AIC = -2\log L(\hat{\theta}|y) + 2k \quad (4.12)$$

Donde  $k$  es el número de parámetros estimados en el modelo estadístico,  $L(\hat{\theta})$  es el valor máximo de la función de verosimilitud. Se calcula el AIC para cada modelo candidato, y seleccionamos el modelo con el valor AIC mas pequeño Burnham y Anderson (2002).

- c) **Graficos Q-Q.** La Figura 4.5 muestra evidencia gráfica de que los datos pueden ser ajustados por la distribución Weibull.

En cada estación, se aplicaron ambas pruebas de bondad de ajuste a los datos de la última y la primera helada (Cuadro 4.3). En cada caso, se prefirió la distribución que tuvo el mínimo AIC y el valor mínimo del estadístico de K-S.

**Cuadro 4.3:** Pruebas de bondad de ajuste: Atotonilco, Almoloya de Juárez, México

Criterio	Última Helada				Primera Helada			
	Gamma	L-Normal	Normal	Weibull	Gamma	L-Normal	Normal	Weibull
Kolmogorov-Smirnov	0.1260	0.1480	0.0908	0.0830	0.1602	0.1645	0.1520	0.1530
AIC	276.866	280.108	272.864	271.959	259.579	259.774	259.304	261.253

#### 4.4. Análisis de ocurrencia de heladas

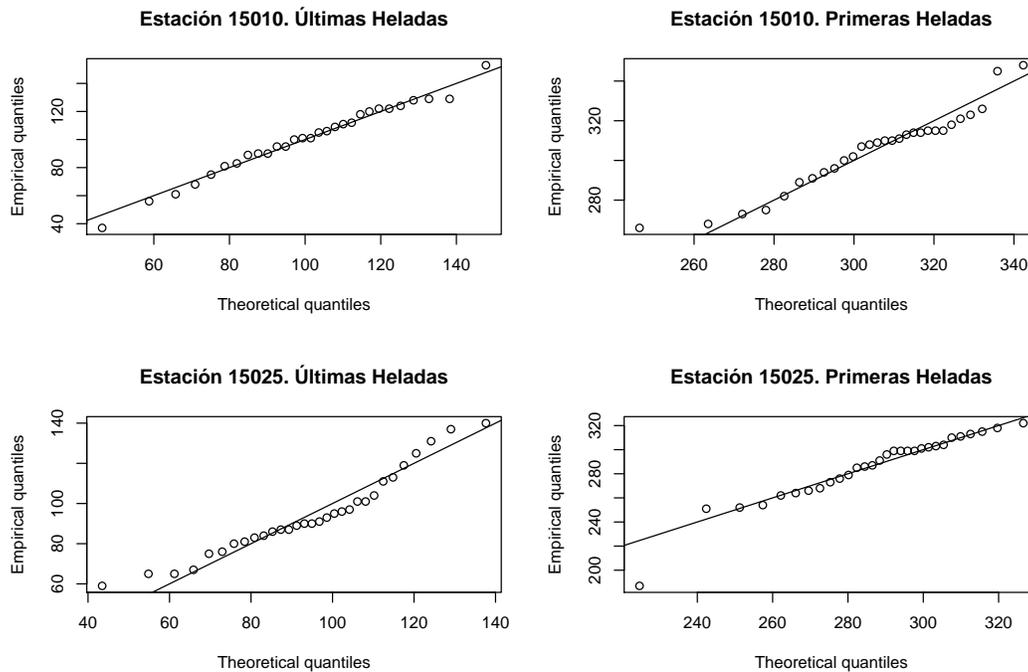


Figura 4.5: Gráfico Q-Q

#### 4.4.5. Selección de una función de distribución teórica

Para facilitar la comparación entre las distribuciones ajustadas, se elaboró una tabla de frecuencias donde se reportó el número de estaciones que fueron seleccionadas en cada una de las distribuciones propuestas de acuerdo con las pruebas de bondad de ajuste.

Con base en las dos pruebas de bondad de ajuste, comparando las cuatro distribuciones ajustadas, se puede observar que los datos de la última heladas fueron ajustados en mayor proporción por las distribuciones Normal y Weibull, mientras que los datos de la primera helada son mejor representados principalmente por la distribución Weibull. Por tanto, se realiza una segunda comparación de ajuste considerando únicamente las distribuciones Normal y Weibull (Cuadro 4.4), en donde de acuerdo con el criterio de AIC la distribución Weibull es más representativa para modelar los datos de ocurrencia de la primera y la última helada, dentro del conjunto de estaciones analizadas.

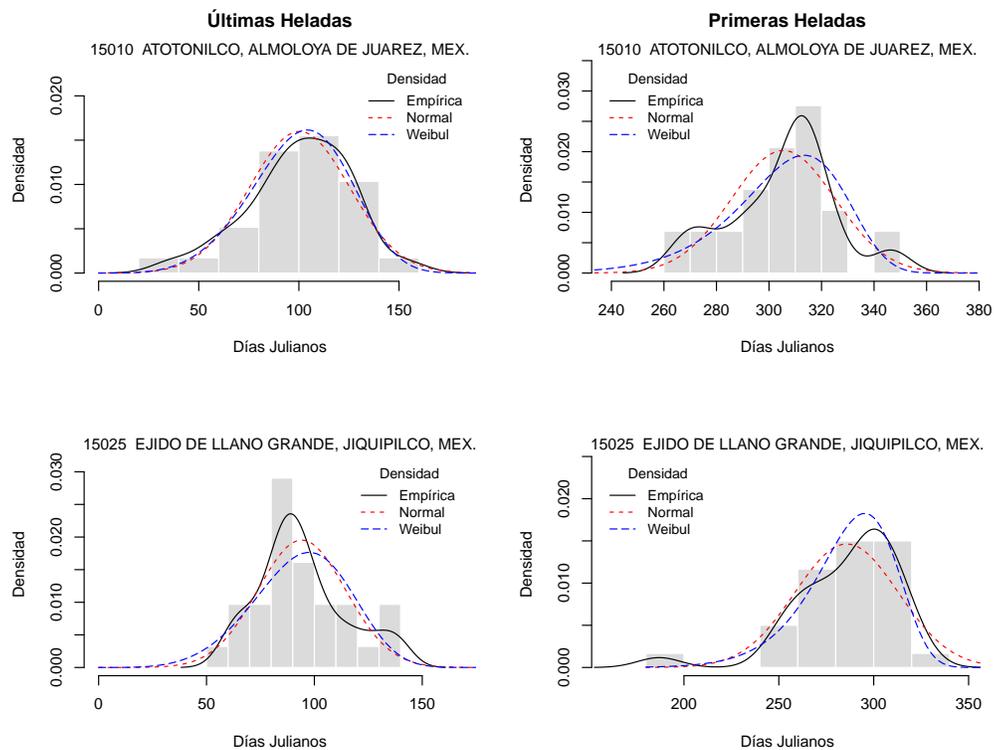
Cabe resaltar que si se considera el estadístico de K-S, éste sugiere seleccionar la distribución Normal para modelar los datos de ocurrencia de la última helada, sin embargo, no es tan representativa cuando se desea modelar los datos de las primeras heladas. Además, es importante señalar que se desea modelar la probabilidad de ocurrencia de una helada en fechas extremas, por lo que el análisis se centra en los valores extremos y en las colas de la distribución, de esta manera resulta razonable seleccionar a la distribución Weibull para realizar inferencia estadística sobre el comportamiento del fenómeno en estudio.

#### 4.4. Análisis de ocurrencia de heladas

**Cuadro 4.4:** Número de estaciones ajustadas en cada distribución, seleccionadas de acuerdo con las pruebas de bondad de ajuste

Distribuciones:	Ajustadas				Seleccionadas	
	Gamma	L-Normal	Normal	Weibull	Normal	Weibull
<b>1. Última Helada</b>						
<b>Estadístico</b>						
Kolmogorov-Smirnov	38	26	103	68	122	113
<b>Criterio</b>						
AIC	26	27	68	114	86	149
<b>2. Primera Helada</b>						
<b>Estadístico</b>						
Kolmogorov-Smirnov	4	69	47	112	117	115
<b>Criterio</b>						
AIC	11	59	32	130	102	130

En la Figura 4.6 se presenta un ejemplo donde se compara el ajuste de las distribuciones Weibull y Normal en relación a la distribución empírica de los datos.



**Figura 4.6:** Distribución de las fechas de ocurrencia de heladas tardías y tempranas

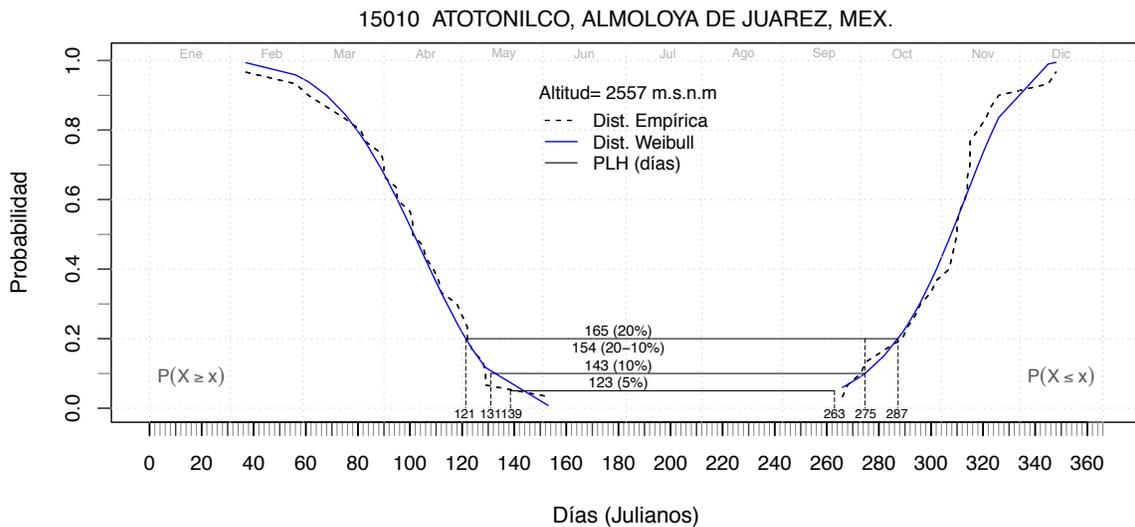
#### 4.4. Análisis de ocurrencia de heladas

##### 4.4.6. Cálculo de probabilidad de ocurrencia de heladas

Los cálculos de probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada, se realizaron a partir de sus funciones de distribución acumulada Weibull, denotadas respectivamente como  $F_{UH}(x)$  y  $F_{PH}(x)$ , donde  $x = \{1, 2, \dots, 365\}$ , es una fecha del año expresada en día juliano. El riesgo de la última helada se midió mediante la probabilidad de que ocurra una helada después de una fecha dada, es decir,  $P(X > x) = 1 - F_{UH}(x)$  y en el caso de la primera helada se calcula la probabilidad de que ésta ocurra antes de determinada fecha, por lo que se expresa como  $P(X \leq x) = F_{PH}(x)$ .

La estimación de las fechas de ocurrencia de la última y la primera helada, se obtuvo mediante la función cuantil que se expresa como  $F(Q(\alpha)) = \alpha$  o utilizando la función inversa de la distribución  $F$  como  $Q(\alpha) = F^{-1}(\alpha)$ , es decir,  $Q(\alpha)$  devuelve el valor de  $x$  para un valor de riesgo  $\alpha \in [0, 1]$ . Formalmente, se define la función cuantil como  $Q(F; a) = \inf\{x|F(x) \geq \alpha\}$  para cualquier  $F \in \Omega$  y para todo  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

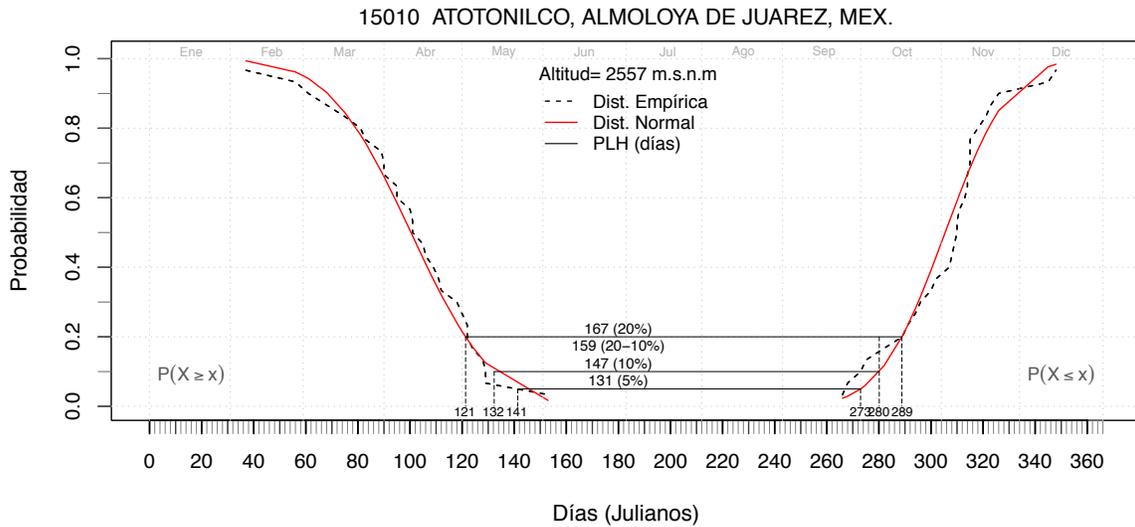
Por lo tanto, para estimar las fechas de ocurrencia de la última y la primera helada de cada estación, se consideraron los valores de  $\alpha = 0.05, 0.10, 0.20$  y se estimaron los cuantiles  $Q(F_{UH}, 1 - \alpha)$  para la última helada y los cuantiles de  $Q(F_{PH}, \alpha)$  para la primera helada, obteniendo así las fechas en días julianos que posteriormente fueron transformadas al formato día-mes. Las fechas estimadas de todas las estaciones se concentraron en una tabla de resultados.



**Figura 4.7:** Probabilidad de ocurrencia de la Primera y Última Helada usando la Distribución Weibull. Estación: Atotonilco, Almoloya de Juárez, Méx.

De esta manera, para cada estación se elaboró una gráfica de la probabilidad de ocurrencia de la última y primera helada en función del día del año, como se muestra en el ejemplo de

#### 4.4. Análisis de ocurrencia de heladas

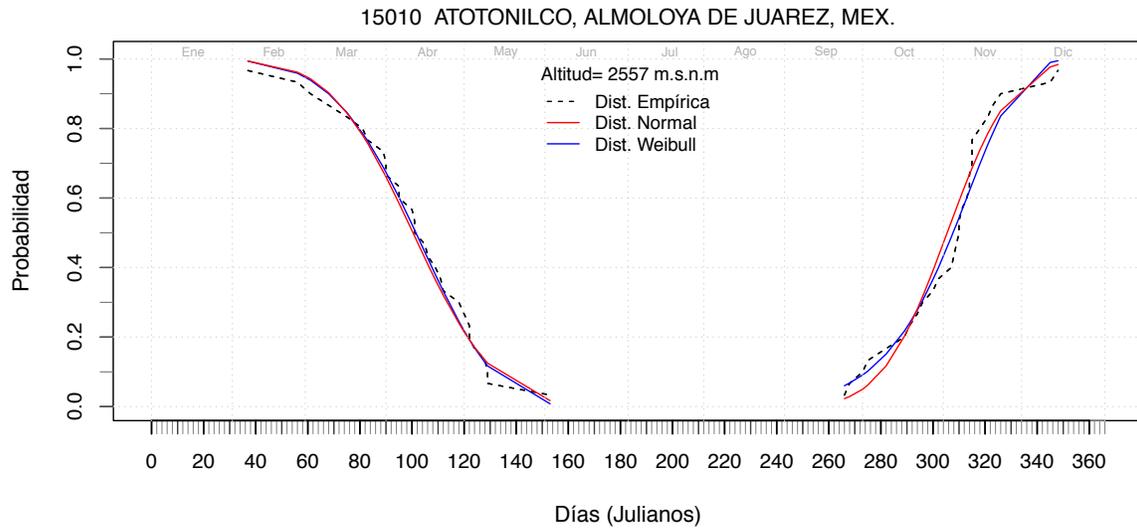


**Figura 4.8:** Probabilidad de ocurrencia de la Primera y Última Helada usando la Distribución Normal. Estación: Atotonilco, Almoloya de Juárez, Méx.

la Figura 4.7, la gráfica también incluye las fechas de ocurrencia de la última y la primera helada con tres diferentes niveles de riesgo, 5 %, 10 % y 20 %, mismos que fueron usados para estimar los periodos libres de heladas (PLH). Las gráficas de todas las estaciones analizadas pueden ser consultadas en el Anexo C.

Con fines comparativos, se elaboró la misma gráfica usando la distribución Normal (Figura 4.8), que fue propuesta por Thom (1959) para para ajustar los datos de las fechas de ocurrencia de la primera y última helada y estimar probabilidades de ocurrencia en fechas determinadas. En la Figura 4.9 se comparan las probabilidades de ocurrencia obtenidas usando las dos distribuciones, donde se observan pequeñas diferencias principalmente en la estimación de las fechas de las primeras heladas, en general, la distribución Weibull estima periodos libres de heladas más cortos en relación con la distribución Normal.

## 4.5. Periodo Libre de Heladas



**Figura 4.9:** Comparación de la Probabilidad de ocurrencia de la Primera y la Última Helada, modeladas mediante las distribuciones Normal y Weibull. Estación: Atotonilco, Almoloya de Juárez, Méx.

## 4.5. Periodo Libre de Heladas

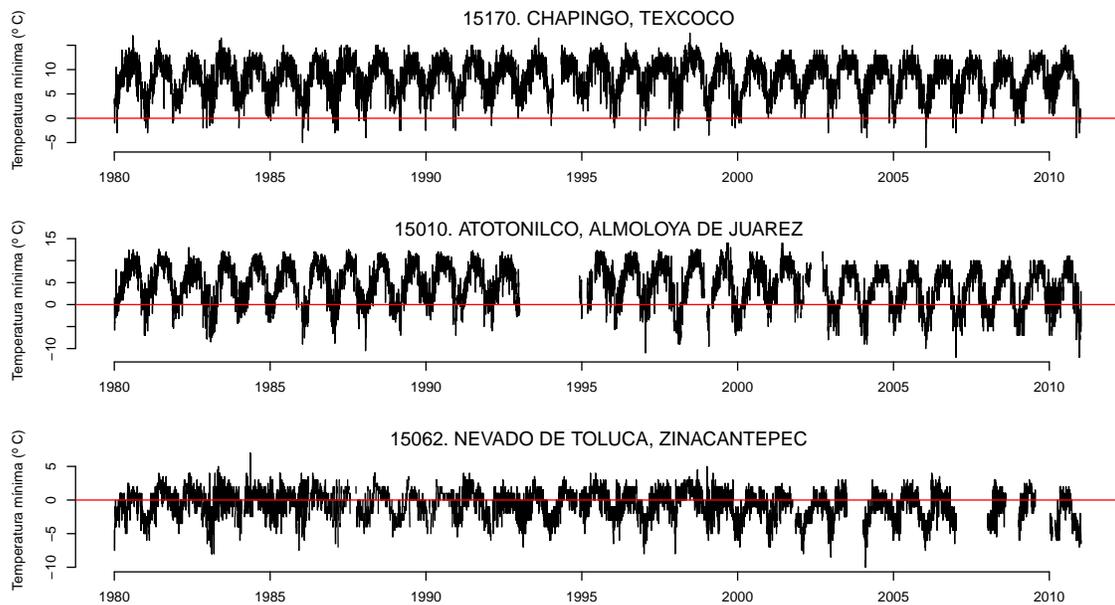
Con base en lo expuesto en la Sección 3.3.3, se estableció que el periodo libre de heladas (en días) para el cultivo del maíz se encuentra delimitado entre la fecha de última helada estimada con un nivel de riesgo del 20% y la fecha de la primera helada con riesgo del 10% ( $PLH_{20-10}$ ). Sin embargo, también se reportan los  $PLH_{5-5}$ ,  $PLH_{10-10}$  y  $PLH_{20-20}$ , como referencia para otros cultivos con diferentes grados de tolerancia a heladas.

En función del conocimiento que se tenga sobre la tolerancia a heladas de otros cultivos, se pueden estimar PLH con diferentes niveles de confianza, estimando las fechas extremas de ocurrencia mediante la función cuantil para un  $\alpha$  determinado, obteniendo:

$$PLH_{(\alpha_1-\alpha_2)}(\text{dias}) = \text{Fecha de la Primera Helada}_{(\alpha_1)} - \text{Fecha de la Ultima Helada}_{(\alpha_2)} - 1$$

## 4.6. Análisis de intensidad de las heladas

Puesto que los datos de interés son los mínimos extremos que rebasan un umbral, la teoría de valores extremos sugiere en estos casos usar el método de *Peaks Over Thresholds* (POT), el cual se basa en el Teorema 3.3, que especifica que el umbral  $u$  debe ser lo suficientemente grande para que la distribución de los excesos se aproxime a una Distribución Pareto Generalizada.



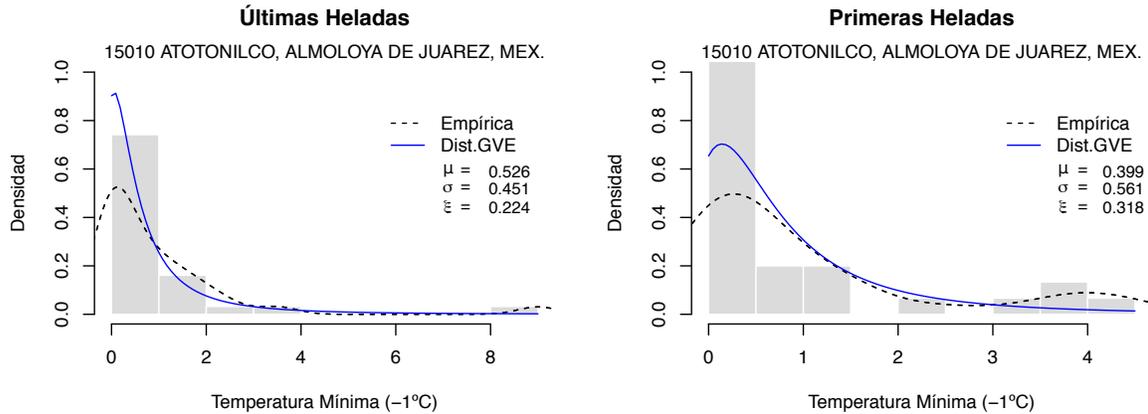
**Figura 4.10:** Variabilidad en el Nivel de las Series de Temperatura Mínima

Sin embargo, cuando  $u$  es bajo, el análisis considera un mayor número de observaciones y disminuyendo la varianza del ajuste y el sesgo puede incrementar cuando se desee modelar observaciones que no pertenecen a las colas de la distribución. En caso contrario, cuando  $u$  es muy alto, disminuye el número de observaciones y crece la varianza del estimador. En consecuencia, el método POT no puede ser aplicado debido a la gran variabilidad en los niveles de las series de tiempo estudiadas, como se puede observar en la Figura 4.10.

Como alternativa, la intensidad fue analizada asumiendo que los datos de la serie de temperaturas mínimas registradas en la última y la primera helada siguen una distribución Generalizada de Valores Extremos (GVE), denotada por la Ecuación 3.8. Los datos para el análisis fueron tomados de los cuadros de registro de cada estación, por ejemplo, para las estaciones 15010 y 15025 se tomaron de los Cuadros 4.2 y 4.5. Para analizar mínimos extremos, se cambió el signo de los datos y posterior al análisis se interpretaron en su valor original. El ajuste se realizó usando el paquete `extRemes` en R-Project.

## 4.6. Análisis de intensidad de las heladas

La estimación de parámetros se realizó por el método de L-momentos, ya que para muestras pequeñas y moderadas éste produce estimaciones computacionalmente convenientes y más eficientes que el método de máxima verosimilitud (Hosking y Wallis, 2005). Como se puede observar en el ejemplo de la Figura 4.11 la distribución GVE presenta buena aproximación a la distribución empírica de los datos.

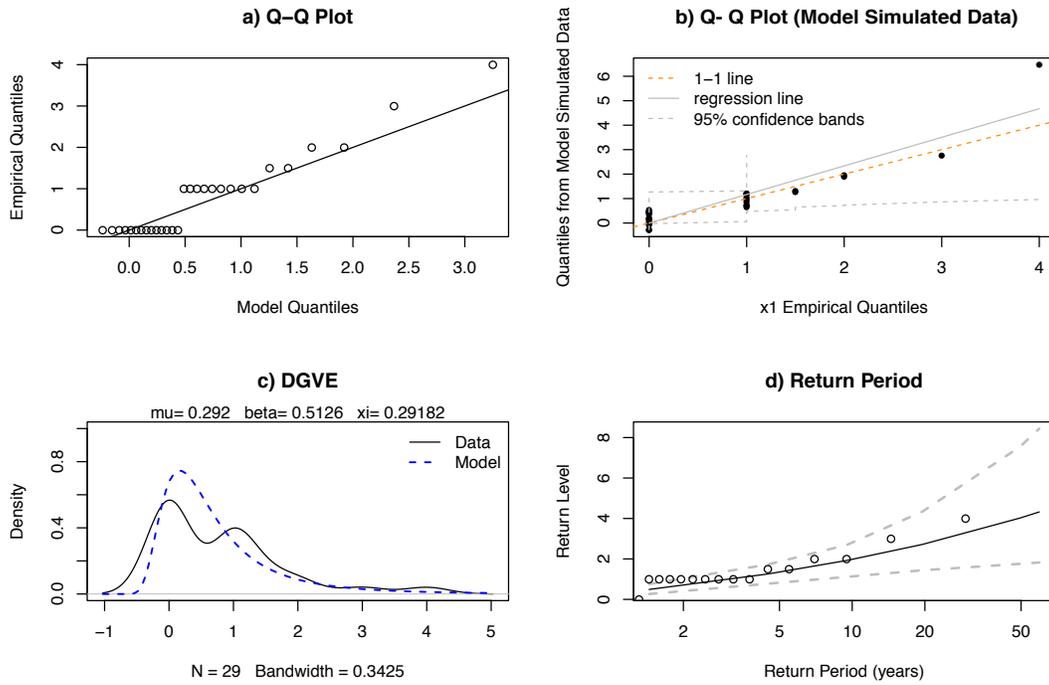


**Figura 4.11:** Ajuste de la distribución GVE a los datos de temperaturas mínimas usando el método L-momentos: Atotonilco, Almoloya de Juarez, Méx.

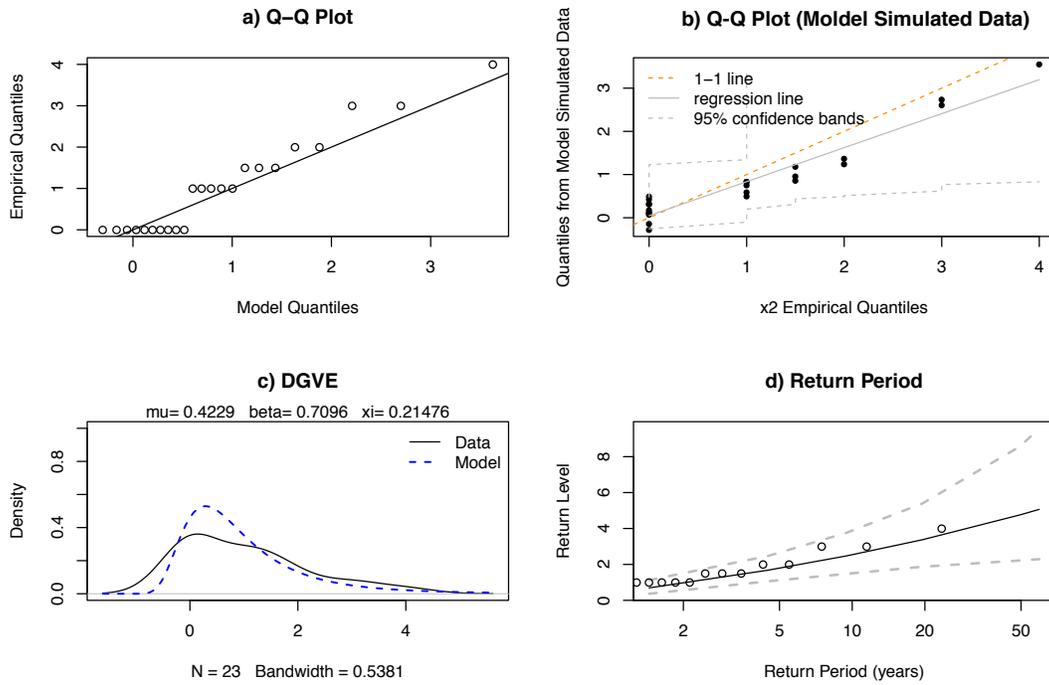
Las Figuras 4.12 y 4.13 corresponden a datos de la última y primera helada respectivamente, muestran en el inciso a) los gráficos Q-Q que dan una idea visual del ajuste de la distribución teórica a los datos de temperaturas mínimas registradas en cada evento, mientras que el inciso b) muestra también una gráfica Q-Q pero considerando un modelo de datos simulados a partir de los parámetros estimados. El inciso c), compara la distribución empírica y la distribución GVE. El inciso d) muestra los periodos de retornos para los diferentes niveles de temperaturas mínimas, cabe resaltar que los valores deben ser interpretados como negativos debido a la previa transformación de los datos.

A partir de las distribuciones GVE ajustadas en cada estación para las últimas y las primeras heladas, se estimaron las probabilidades de que en un evento se alcance una intensidad de temperatura mínima menor o igual a 0, -1, -2 y -3 °C, evaluando éstos valores con signo positivo en la función de distribución acumulada  $F(x)$  correspondiente a cada caso. Las probabilidades calculadas de todas las estaciones, se concentraron en una sola base de datos.

## 4.6. Análisis de intensidad de las heladas



**Figura 4.12:** Gráficas de Ajuste: Últimas Heladas, Jipilco, Méx.



**Figura 4.13:** Gráficas de Ajuste: Primeras Heladas, Jipilco, Méx.

## 4.6. Análisis de intensidad de las heladas

**Cuadro 4.5:** Fechas de ocurrencia y temperaturas de la última y la primera helada.  
Estación 15025. Ejido de Llano Grande, Jipilco, Méx. (1980-2010)

Año	Última Helada (UH)			Primera Helada (PH)			PLH
	Día Juliano	Fecha	Temp. (°C)	Día Juliano	Fecha	Temp. (°C)	
1980	65	5-Mar	0	262	18-Sep	0	196
1981	90	31-Mar	-1	315	11-Nov	-2.5	224
1982	67	8-Mar	-1.5	299	26-Oct	-0.5	231
1983	101	11-Apr	-1.5	318	14-Nov	0	216
1984	104	13-Apr	0	310	5-Nov	-0.1	205
1985	93	3-Apr	0	299	26-Oct	-1.5	205
1986	87	28-Mar	-1.5	299	26-Oct	0	211
1987	96	6-Apr	0	276	3-Oct	-0.5	179
1988	95	4-Apr	0	254	10-Sep	-4	158
1989	111	21-Apr	0	285	12-Oct	-1	173
1990	59	28-Feb	0	304	31-Oct	0	244
1991	91	1-Apr	-0.5	279	6-Oct	0	187
1992	113	22-Apr	0	301	27-Oct	-1.5	187
1993	131	11-May	0	287	14-Oct	0	155
1994	87	28-Mar	0	299	26-Oct	-0.5	211
1995	97	7-Apr	-0.5	252	9-Sep	-0.5	154
1996	101	10-Apr	-0.5	286	12-Oct	-0.5	184
1997	119	29-Apr	0	291	18-Oct	-4.5	171
1998	84	25-Mar	-1	303	30-Oct	-0.5	218
1999	75	16-Mar	-2.5	264	21-Sep	-0.5	188
2000	137	16-May	-2	251	7-Sep	-0.5	113
2001	90	31-Mar	-3.5	296	23-Oct	-3.5	205
2002	81	22-Mar	-0.5	187	6-Jul	-1	105
2003	86	27-Mar	0	302	29-Oct	0	215
2004	83	23-Mar	-1	311	6-Nov	-4	227
2005	125	5-May	-0.5	266	23-Sep	-1.5	140
2006	80	21-Mar	-1	322	18-Nov	0	241
2007	140	20-May	0	268	25-Sep	0	127
2008	76	16-Mar	-2	-	-	-	290
2009	65	6-Mar	0	313	9-Nov	0	247
2010	89	30-Mar	-9	273	30-Sep	-1	183

### 4.6.1. Periodos de Retorno

El periodo de retorno representa la probabilidad de un evento extremo y se expresa en años y se define como el número promedio de años en que un evento puede ser igualado o excedido (Breña y Breña, 2005).

## 4.6. Análisis de intensidad de las heladas

---

La probabilidad de que un evento extremo con un periodo de retorno  $T_r$  ocurra en cualquier año es igual a

$$p = \frac{1}{T_r} \quad (4.13)$$

En el caso específico de una serie de eventos máximos anuales, el periodo de retorno que se asocia a cada uno de ellos, puede ser estimado a partir de la fórmula de Weibull (1939)

$$T_r = \frac{n+1}{m} \quad (4.14)$$

donde  $m$  es el número de orden, y  $n$  es el número total de años de registro.

El cuantil correspondiente a un evento de  $T_r$  años se define como el valor  $X_{T_r}$ , que está vinculada a una determinada probabilidad de excedencia  $p$  o bien a un periodo de retorno  $T_r$ . En esta definición el concepto de periodo de retorno de  $T_r$  años se define como el inverso de  $p$ :

$$T_r = \frac{1}{p} = \frac{1}{1 - F(x)} = \frac{1}{1 - q} \quad (4.15)$$

donde  $T_r$  es el periodo de retorno en años;  $p$  es la probabilidad de excedencia; y  $F(x) = q$  es la probabilidad de no excedencia. Por ejemplo, si  $F(x) = 0.99$ , se tiene que  $p = 0.01$  y  $T_r = 100$  años.

## 4.7. Elaboración de mapas de riesgos de ocurrencia e intensidad de las heladas

Una forma práctica de visualizar los resultados obtenidos es mediante la presentación de mapas de riesgo, los cuales se elaboran a partir de la localización geográfica y las variables calculadas en cada una de las estaciones meteorológicas mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), ya que éstos cuentan con herramientas que permiten combinar el análisis estadístico e interpolación espacial para crear superficies continuas de variables climáticas (Díaz *et al.*, 2008) o derivadas.

### a) Mapas de riesgo de ocurrencia de heladas en fechas extremas

Se construyó una tabla con los resultados de todas las estaciones, que incluye las variables: i) Coordenadas geográficas de cada estación meteorológica, ii) Fechas de la última y primera helada (día juliano) estimada a un nivel de riesgo de 5, 10 y 20 %. y iii) Los Periodos Libres de Heladas (días) estimados con los niveles de confianza 5-5, 10-10, 20-20 y 10-20 %.

Posteriormente, se elaboró un mapa de riesgo por cada una de las variables listadas en ii) y iii), usando el método de interpolación *Spline*, para lo cual se utilizó el programa ArcMap 10.0 (ESRI, 2010). Para representar los riesgos de ocurrencia de la primera y última helada, la zona de estudio se clasificó cada 15 días, y para representar los PLH, se realizó una clasificación cada 30 días.

### b) Mapas de intensidad de heladas

Usando el mismo método de interpolación y la tabla de resultados elaborada en la Sección 4.6, se elaboraron mapas de probabilidades a diferentes intensidades de la temperatura mínima: 0, -1, -2, y -3 °C.

# Capítulo 5

## Resultados

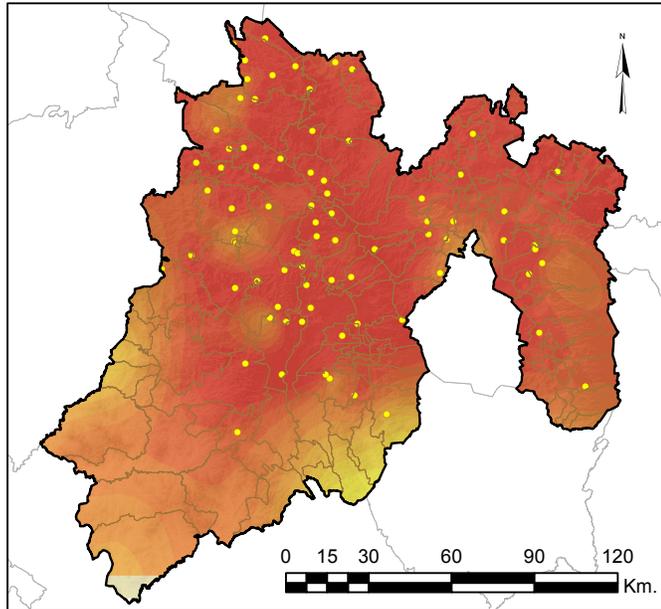
### 5.1. Régimen de ocurrencia de heladas

Con base en el modelo mixto utilizado para caracterizar la ocurrencia y no-ocurrencia de heladas, La Figura 5.1 muestra la distribución espacial de los componente discreto del modelo ( $p_s$  y  $p_a$ ) que proporcionan información sobre la probabilidades de ocurrencia de una helada tardía o temprana en un año con base en la frecuencia de heladas registradas durante el periodo de estudio analizado. Éstos mapas también pueden ser interpretados como la probabilidad de no ocurrencia ( $q_s$  y  $q_a$ ), para identificar las áreas en las que las heladas ocurren con menos frecuencia.

De acuerdo con los mapas, se observa que las últimas heladas presentan mayor probabilidad de ocurrencia que las primeras heladas, lo cual indica que las heladas tienden a concentrarse más hacia el primer semestre del año. Por otro lado, el mapa de la primeras heladas resulta de mayor utilidad para definir las zonas de mayor riesgo de impactos por heladas, ya que las últimas heladas son las que más daños ocasionan dado el avanzado estado fenológico de los cultivos. Geográficamente, la mayor probabilidad de heladas (70-100 %) se concentra en el centro y norte del estado, resaltando el área que comprende el Valle de Toluca, los límites con el estado de Hidalgo y los límites localizados al noreste del Distrito Federal. Dicha área, posee gran importancia económica ya que representa el área agrícola con mayor potencial productiva de maíz y otros cultivos en el estado. En contraparte, las áreas con menor probabilidad de ocurrencia de heladas se localizan en la región sur y suroeste del estado, sin embargo, ésta región no es muy apta para la agricultura mecanizada o de tracción animal, por lo que su uso potencial es para la agricultura manual.

## 5.1. Régimen de ocurrencia de heladas

### Última Helada



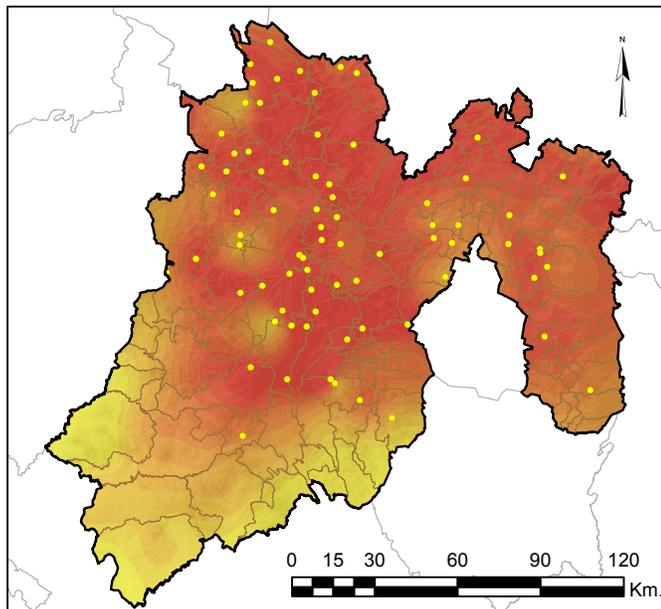
### Simbología

- Estado de México
- Límites Estatales
- Límites Municipales
- Estaciones Meteorológicas

### Probabilidad (%)

- < 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100

### Primera Helada



### Simbología

- Estado de México
- Límites Estatales
- Límites Municipales
- Estaciones Meteorológicas

### Probabilidad (%)

- < 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100

Figura 5.1: Mapa de probabilidad de ocurrencia de heladas tardías y tempranas

### 5.2. Estimación de la fecha de la última helada (UH), primera helada (PH)

La segunda parte del modelo mixto involucra el componente continuo, el cual modela las probabilidades de ocurrencia de una helada en determinadas fechas, dado que sí se presentó el fenómeno. En ese sentido, a continuación se describen los principales resultados obtenidos.

A partir de la base de datos de temperaturas mínimas reportadas por el Sistema CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional, se extrajeron las series de datos de fechas de ocurrencia de la última y primera helada en 236 estaciones meteorológicas, 77 de ellas localizadas en el Estado de México y 159 en los estados colindantes. Se probó el ajuste a los datos de cuatro distribuciones paramétricas: Gamma, Log-Normal, Normal y Weibull, resultando seleccionada la distribución Weibull, ya que ésta presentó mejor ajuste de acuerdo con el AIC y el estadístico de Kolmogorov Smirnov.

De esta manera, usando como modelo la distribución Weibull, se estimaron las fechas de ocurrencia de la última y la primera helada en cada una de las estaciones estudiadas considerando el 5, 10 y 20 % de riesgo ocurrencia después de la última helada y antes de la primera helada. Así mismo, se estimó el Periodo Libre de Heladas tolerando los niveles de riesgo entre la última y la primera helada: 5-5 %, 10-10 %, 20-20 % y 20 %-10 %. Los resultados obtenidos en las estaciones meteorológicas del Estado de México se reportan en el Cuadro 5.3, complementariamente se reportan los resultados de los estados con los que limita en los Cuadros 5.1, 5.2, 5.4, 5.5 y 5.6.

De manera homologa, en las secciones 5.2.1. y 5.2.2. esta información se presenta en mapas de riesgo donde se puede observar gráficamente la distribución espacial de las fechas de ocurrencia de heladas tardías y tempranas en la zona de estudio.

## 5.2. Estimación de la fecha de la última helada (UH), primera helada (PH)

**Cuadro 5.1:** Fechas de Ocurrencia de la Última y Primera Helada y Periodo Libre de Heladas en los estados de D.F. y Guanajuato.

ID	Lugar	Última Helada			Primera Helada			PLH (días)			
		5 %	10 %	20 %	5 %	10 %	20 %	5-5 %	10-10 %	20-20 %	20-10 %
9029	Gran Canal Km. 06+250, D.F.	6-Mar	26-Feb	17-Feb	24-Oct	5-Nov	17-Nov	231	251	272	260
9043	San Juan de Aragón, D.F.	15-Mar	2-Mar	17-Feb	3-Nov	12-Nov	22-Nov	232	254	277	267
11004	Aldama, Gto.	3-Mar	22-Feb	12-Feb	10-Nov	18-Nov	27-Nov	251	268	287	278
11011	Cinco Señores, Gto.	6-Abr	22-Mar	6-Mar	13-Oct	25-Oct	7-Nov	189	216	245	232
11015	Charcas, Gto.	26-Mar	18-Mar	9-Mar	3-Oct	16-Oct	31-Oct	190	211	235	220
11017	Dolores Hidalgo, Gto.	25-Mar	15-Mar	3-Mar	7-Oct	20-Oct	2-Nov	195	218	243	230
11022	El Terrero, Gto.	15-Feb	10-Feb	4-Feb	8-Oct	21-Oct	5-Nov	234	252	273	258
11023	Guanajal, Gto.	17-Mar	6-Mar	21-Feb	30-Oct	9-Nov	19-Nov	226	247	270	260
11025	Hacienda de Arriba, Gto.	5-Mar	27-Feb	20-Feb	7-Oct	21-Oct	4-Nov	215	235	256	242
11031	Jerécuaro, Gto.	31-Mar	20-Mar	8-Mar	15-Oct	27-Oct	9-Nov	197	220	245	232
11033	La Begoña, Gto.	22-Mar	9-Mar	22-Feb	13-Oct	26-Oct	8-Nov	204	230	258	245
11035	La Sandía, Gto.	17-Mar	8-Mar	25-Feb	15-Oct	28-Oct	10-Nov	211	233	257	244
11036	Adjuntas, Gto.	11-Abr	28-Mar	12-Mar	7-Oct	20-Oct	2-Nov	178	205	234	221
11042	Los Rodríguez, Gto.	29-Mar	23-Mar	16-Mar	28-Sep	10-Oct	24-Oct	182	200	221	207
11045	Media Luna, Gto.	1-May	13-Abr	24-Mar	14-Oct	24-Oct	4-Nov	165	193	224	213
11049	Nuevo Valle Moreno, Gto.	19-Mar	12-Mar	3-Mar	28-Oct	7-Nov	18-Nov	222	239	259	248
11050	Ocampo, Gto.	21-Mar	12-Mar	2-Mar	1-Oct	14-Oct	28-Oct	193	215	239	225
11051	Peñuelitas, Gto.	28-Mar	20-Mar	11-Mar	3-Oct	15-Oct	28-Oct	188	208	230	217
11053	Pozos, Gto.	14-Abr	7-Abr	29-Mar	11-Sep	26-Sep	12-Oct	149	171	196	180
11055	Purísima de Bustos, Gto.	16-Mar	9-Mar	28-Feb	11-Oct	23-Oct	5-Nov	208	227	249	236
11060	Salvatierra, Gto.	15-Mar	2-Mar	16-Feb	25-Oct	5-Nov	16-Nov	223	247	272	261
11061	San Antón, Gto.	22-Mar	12-Mar	1-Mar	5-Nov	15-Nov	25-Nov	227	247	268	258
11063	San Cristóbal, Gto.	2-Jun	2-May	30-Mar	12-Ago	3-Sep	29-Sep	70	123	182	156
11066	San José Iturbide, Gto.	21-Mar	10-Mar	25-Feb	6-Oct	19-Oct	3-Nov	198	222	250	235
11068	San Luis de La Paz, Gto.	1-Abr	22-Mar	10-Mar	17-Oct	29-Oct	11-Nov	198	220	245	232
11072	Santa Rita, Gto.	21-Mar	8-Mar	22-Feb	17-Oct	27-Oct	8-Nov	209	232	258	246
11077	Tarandacuao, Gto.	10-Mar	1-Mar	18-Feb	15-Oct	27-Oct	9-Nov	218	239	263	250
11079	Valle de Santiago, Gto.	25-Feb	18-Feb	10-Feb	28-Oct	6-Nov	15-Nov	244	260	277	268
11085	Dos Arroyos, Gto.	5-Abr	25-Mar	12-Mar	22-Oct	1-Nov	13-Nov	199	220	245	233
11093	San Miguel de Allende, Gto.	13-Mar	1-Mar	16-Feb	25-Oct	4-Nov	16-Nov	225	247	272	260
11100	Roque, Gto.	23-Mar	12-Mar	27-Feb	7-Nov	16-Nov	24-Nov	228	248	269	261
11105	Ameche, Gto.	8-Mar	26-Feb	15-Feb	30-Oct	9-Nov	19-Nov	235	255	276	266
11107	La Quemada, Gto.	22-Mar	14-Mar	4-Mar	6-Oct	19-Oct	1-Nov	197	218	241	228
11116	Hacienda San Lucas, Gto.	26-Mar	18-Mar	8-Mar	3-Oct	15-Oct	29-Oct	190	210	234	220
11122	Presa Jalpa, Gto.	16-Mar	4-Mar	19-Feb	28-Oct	8-Nov	21-Nov	225	248	274	261
11131	Las Trojes, Gto.	29-Mar	23-Mar	15-Mar	15-Oct	26-Oct	6-Nov	199	216	235	224
11134	El Conejo, Gto.	5-Mar	24-Feb	14-Feb	14-Oct	26-Oct	9-Nov	222	243	267	253
11135	Arperos, Gto.	15-Mar	7-Mar	27-Feb	19-Nov	26-Nov	4-Dic	248	263	279	271
11140	El Carbón, Gto.	4-Abr	28-Mar	20-Mar	1-Oct	14-Oct	29-Oct	179	199	222	207
11141	Ciénega de Negros, Gto.	26-Abr	13-Abr	29-Mar	12-Oct	23-Oct	5-Nov	168	192	220	207
11142	El Cubo, Gto.	13-Mar	4-Mar	22-Feb	12-Oct	24-Oct	6-Nov	212	233	256	243
11148	El Obraje, Gto.	21-Mar	8-Mar	22-Feb	14-Oct	27-Oct	11-Nov	206	232	261	246
11150	San José El Alto, Gto.	17-Abr	29-Mar	9-Mar	16-Oct	27-Oct	8-Nov	181	211	243	231
11151	Tacubaya, Gto.	28-Feb	20-Feb	10-Feb	24-Nov	30-Nov	6-Dic	268	282	298	292
11155	Corral de Piedras, Gto.	22-Mar	10-Mar	25-Feb	18-Oct	30-Oct	12-Nov	209	233	259	246
11157	Peñuelas, Gto.	29-Abr	12-Abr	23-Mar	11-Sep	29-Sep	18-Oct	134	169	208	189
11159	Presa El Barrial, Gto.	4-Abr	19-Mar	2-Mar	16-Oct	28-Oct	10-Nov	194	222	252	239
11160	San Isidro, Gto.	4-May	24-Abr	11-Abr	21-Sep	1-Oct	12-Oct	139	159	183	172
11161	El Vergel, Gto.	10-Abr	1-Abr	22-Mar	15-Oct	27-Oct	8-Nov	187	208	230	218
11162	Comanjilla, Gto.	5-Mar	22-Feb	10-Feb	21-Oct	1-Nov	14-Nov	229	251	276	263
11166	El Gigante, Gto.	31-Mar	16-Mar	28-Feb	7-Oct	20-Oct	4-Nov	189	217	248	233

## 5.2. Estimación de la fecha de la última helada (UH), primera helada (PH)

**Cuadro 5.2:** Fechas de Ocurrencia de la Última y Primera Helada y Periodo Libre de Heladas en el estado de Hidalgo.

ID	Lugar	Última Helada			Primera Helada			PLH (días)			
		5 %	10 %	20 %	5 %	10 %	20 %	5-5 %	10-10 %	20-20 %	20-10 %
13012	Huichapan, Hgo.	22-Mar	10-Mar	26-Feb	30-Sep	12-Oct	26-Oct	191	215	241	227
13013	Ixmiquilpan (SMN), Hgo.	25-Mar	19-Mar	12-Mar	2-Oct	15-Oct	30-Oct	190	209	231	216
13018	Mixquiahuala (SMN), Hgo.	28-Mar	17-Mar	4-Mar	18-Oct	30-Oct	11-Nov	203	226	251	239
13027	San Jerónimo, Hgo.	17-Jun	9-Jun	30-May	6-Sep	17-Sep	28-Sep	80	99	120	109
13042	Zacualtipán (SMN), Hgo.	5-Abr	29-Mar	20-Mar	26-Sep	10-Oct	25-Oct	173	194	218	203
13060	Actopan, Hgo.	11-Abr	3-Abr	25-Mar	1-Oct	13-Oct	26-Oct	172	192	214	201
13061	Alcholya, Hgo.	4-May	12-Abr	19-Mar	12-Oct	25-Oct	7-Nov	160	195	232	219
13064	Chapantongo, Hgo.	5-Abr	27-Mar	16-Mar	25-Sep	7-Oct	21-Oct	172	193	218	204
13065	Encarnación, Hgo.	9-Abr	26-Mar	10-Mar	23-Sep	6-Oct	21-Oct	166	193	224	209
13068	El Salto, Hgo.	12-Abr	6-Abr	28-Mar	18-Sep	1-Oct	16-Oct	158	177	201	186
13069	El Mezquital Km. 150, Hgo.	7-Abr	26-Mar	12-Mar	9-Oct	22-Oct	5-Nov	184	209	237	223
13070	Santuario, Hgo.	6-Abr	30-Mar	20-Mar	11-Sep	25-Sep	12-Oct	157	178	205	188
13075	Jasso, Hgo.	26-Abr	15-Abr	2-Abr	21-Sep	4-Oct	18-Oct	147	171	198	184
13079	Presa El Girón, Hgo.	24-Abr	11-Abr	26-Mar	29-Sep	13-Oct	28-Oct	157	184	215	200
13080	Presa Endho, Hgo.	29-Mar	18-Mar	4-Mar	8-Oct	21-Oct	4-Nov	192	216	244	230
13081	Presa Golondrinas, Hgo.	16-Abr	7-Abr	27-Mar	26-Sep	9-Oct	24-Oct	162	184	210	195
13082	Presa La Esperanza, Hgo.	10-Abr	1-Abr	21-Mar	27-Sep	11-Oct	26-Oct	169	192	218	203
13083	Presa Madero, Hgo.	28-Mar	21-Mar	11-Mar	29-Sep	12-Oct	26-Oct	184	204	228	214
13084	Presa Requena, Hgo.	19-Abr	3-Abr	16-Mar	18-Oct	30-Oct	11-Nov	181	209	239	227
13085	Presa Tezoyo, Hgo.	22-Jun	14-Jun	4-Jun	9-Ago	24-Ago	8-Sep	47	70	95	80
13089	Tepeji del Río, Hgo.	28-Mar	19-Mar	9-Mar	3-Oct	16-Oct	30-Oct	188	210	234	220
13090	Río Salado, Hgo.	8-Abr	25-Mar	8-Mar	30-Sep	14-Oct	28-Oct	174	202	233	219
13092	Tula (DGE), Hgo.	3-May	16-Abr	28-Mar	2-Sep	21-Sep	11-Oct	121	157	196	176
13093	Venados, Hgo.	28-Mar	14-Mar	26-Feb	28-Nov	3-Dic	9-Dic	244	263	285	279
13095	Agua Blanca, Hgo.	15-May	1-May	15-Abr	31-Ago	15-Sep	2-Oct	107	136	169	152
13096	Atotonilco, Hgo.	2-Abr	19-Mar	3-Mar	13-Nov	21-Nov	29-Nov	224	246	270	262
13097	Chilcuautla, Hgo.	9-Abr	29-Mar	16-Mar	25-Sep	8-Oct	23-Oct	168	192	220	205
13098	Huasca, Hgo.	31-Mar	26-Mar	19-Mar	14-Sep	28-Sep	14-Oct	166	185	208	192
13099	Metepc, Hgo.	12-Abr	31-Mar	18-Mar	28-Sep	12-Oct	27-Oct	168	194	222	207
13100	Omitlán, Hgo.	9-May	27-Apr	13-Apr	28-Sep	10-Oct	24-Oct	141	165	193	179
13105	Cardonal, Hgo.	26-Mar	16-Mar	5-Mar	15-Oct	27-Oct	9-Nov	202	224	248	235
13109	ETA 385 Sgo. de Anaya, Hgo.	9-Apr	26-Mar	10-Mar	27-Aug	15-Sep	5-Oct	139	172	208	188
13112	Mineral del Chico, Hgo.	12-May	24-Apr	4-Apr	6-Sep	23-Sep	11-Oct	116	151	189	171
13115	Real del Monte, Hgo.	5-May	21-Apr	5-Apr	8-Sep	25-Sep	14-Oct	125	156	191	172
13116	EL Zembo, Hgo.	28-May	19-May	8-May	16-Sep	25-Sep	5-Oct	110	128	149	139
13121	Santa María Amajac, Hgo.	18-Apr	6-Apr	23-Mar	30-Sep	12-Oct	26-Oct	164	188	216	202
13125	Alfajayucan (DGE), Hgo.	3-Apr	22-Mar	7-Mar	4-Oct	17-Oct	30-Oct	183	208	236	223
13148	Xitha, Hgo.	7-Apr	29-Mar	18-Mar	11-Oct	22-Oct	3-Nov	186	206	229	217
13149	El Banco, Hgo.	2-Apr	26-Mar	19-Mar	13-Sep	29-Sep	16-Oct	163	186	210	193
13151	El Encino, Hgo.	7-Apr	29-Mar	19-Mar	19-Sep	3-Oct	19-Oct	164	187	213	197
13152	El Potrero, Hgo.	20-May	4-May	15-Apr	24-Sep	7-Oct	21-Oct	126	155	188	174

**Cuadro 5.3:** Fechas de Ocurrencia de la Última y Primera Helada y Periodo Libre de Heladas en el estado de México.

ID	Lugar	Última Helada			Primera Helada			PLH (días)			
		5 %	10 %	20 %	5 %	10 %	20 %	5-5 %	10-10 %	20-20 %	20-10 %
15002	Aculco (SMN), Mex.	3-Abr	23-Mar	11-Mar	25-Sep	8-Oct	22-Oct	174	198	224	210
15008	Atenco, Mex.	11-Abr	31-Mar	18-Mar	9-Sep	24-Sep	11-Oct	150	176	206	189
15010	Atotonilco, Mex.	19-May	11-May	1-May	20-Sep	2-Oct	14-Oct	123	143	165	153
15014	Capulhuac, Mex.	21-Abr	11-Abr	29-Mar	28-Sep	11-Oct	25-Oct	159	182	209	195
15020	Chalco -San Lucas-, Mex.	17-Abr	3-Abr	17-Mar	4-Oct	14-Oct	24-Oct	169	193	220	210
15022	Chiconautla, Mex.	23-Abr	11-Abr	29-Mar	29-Sep	11-Oct	24-Oct	158	182	208	195
15024	Presa Danxho, Mex.	23-Abr	13-Abr	1-Abr	3-Sep	17-Sep	3-Oct	132	156	184	168
15025	Ejido de Llano Grande, Mex.	9-May	2-May	23-Abr	30-Ago	12-Sep	25-Sep	112	132	154	141
15028	El Tajo -Tunel Viejo-, Mex.	3-May	23-Abr	12-Abr	10-Sep	24-Sep	8-Oct	129	153	178	164
15029	El Tejocote, Mex.	18-Abr	13-Abr	5-Abr	19-Sep	30-Sep	13-Oct	153	169	190	177

## 5.2. Estimación de la fecha de la última helada (UH), primera helada (PH)

ID	Lugar	Última Helada			Primera Helada			PLH (días)			
		5 %	10 %	20 %	5 %	10 %	20 %	5-5 %	10-10 %	20-20 %	20-10 %
15037	Jiquipilco, Mex.	1-Jun	10-May	14-Abr	7-Ago	28-Ago	22-Sep	66	109	160	135
15038	Joquicingo, Mex.	2-May	19-Abr	4-Abr	31-Oct	9-Nov	19-Nov	181	203	228	218
15041	Gran Canal Km 27+250, Mex.	13-Abr	4-Abr	23-Mar	1-Oct	13-Oct	26-Oct	170	191	216	203
15045	La Marquesa, Mex.	17-Jun	9-Jun	30-May	3-Sep	16-Sep	30-Sep	77	98	122	108
15047	Las Arboledas, Mex.	30-Mar	16-Mar	2-Mar	26-Oct	5-Nov	15-Nov	209	233	257	247
15051	Los Velázquez, Mex.	14-May	9-May	1-May	7-Oct	15-Oct	24-Oct	145	158	175	166
15055	Maquixco, Mex.	20-Mar	13-Mar	6-Mar	7-Sep	25-Sep	14-Oct	170	195	221	202
15058	Molinito, Mex.	8-Mar	25-Feb	13-Feb	24-Oct	4-Nov	17-Nov	229	251	276	263
15062	Nevado de Toluca, Mex.	6-Jul	4-Jul	1-Jul	16-Jun	22-Jun	28-Jun	0	0	0	0
15063	Nueva Santa Elena, Mex.	6-May	29-Abr	21-Abr	1-Oct	11-Oct	21-Oct	147	164	182	172
15064	Oxthoc, Mex.	12-Abr	2-Abr	20-Mar	2-Oct	15-Oct	29-Oct	172	195	222	208
15066	Palizada, Mex.	16-Jun	9-Jun	31-May	15-Ago	29-Ago	14-Sep	59	80	105	89
15069	Polotitlán, Mex.	29-Abr	17-Abr	2-Abr	15-Sep	15-Oct	18-Oct	138	166	198	181
15071	Presa El Tigre, Mex.	27-May	19-May	8-May	25-Sep	4-Oct	14-Oct	120	137	158	148
15073	Presa Guadalupe, Mex.	23-Mar	12-Mar	28-Feb	14-Oct	25-Oct	6-Nov	204	226	250	238
15074	Presa La Concepción, Mex.	16-Abr	3-Abr	18-Mar	3-Oct	16-Oct	29-Oct	169	195	224	211
15075	Presa Las Ruinas, Mex.	10-Abr	30-Mar	17-Mar	24-Sep	7-Oct	21-Oct	166	190	217	203
15076	Presa Tepetitlán, Mex.	26-May	12-May	26-Abr	24-Ago	9-Sep	27-Sep	89	119	153	135
15078	Presa Fco. Trinidad Fabel, Mex.	14-May	27-Abr	7-Abr	19-Sep	3-Oct	18-Oct	127	158	193	178
15083	San Andrés, Mex.	29-Mar	19-Mar	6-Mar	22-Sep	6-Oct	22-Oct	176	200	229	213
15085	San Bartolo del Llano, Mex.	19-Abr	13-Abr	6-Abr	14-Sep	27-Sep	11-Oct	147	166	187	173
15086	San Bernabé, Mex.	24-May	14-May	1-May	25-Sep	5-Oct	17-Oct	123	143	168	156
15088	San Francisco Oxtotitlan, Mex.	4-Jun	23-May	8-May	23-Ago	10-Sep	30-Sep	79	109	144	124
15089	San Fco. Tlalcalcalpan, Mex.	28-Mar	17-Mar	4-Mar	6-Oct	19-Oct	2-Nov	191	215	242	228
15093	San Lorenzo Malacota, Mex.	27-Jun	3-Jun	6-May	26-Ago	11-Sep	30-Sep	59	99	146	127
15098	San Martín Obispo, Mex.	4-May	12-Abr	19-Mar	13-Oct	25-Oct	8-Nov	161	195	233	219
15103	San Pedro Nexapa, Mex.	11-Abr	25-Mar	6-Mar	24-Sep	11-Oct	29-Oct	165	199	236	218
15104	San Pedro Putla, Mex.	1-Jun	21-May	7-May	20-Sep	30-Sep	11-Oct	110	131	156	145
15108	Santa María del Monte, Mex.	3-Abr	17-Mar	26-Feb	4-Oct	18-Oct	2-Nov	183	214	248	233
15115	Sto. Tomas Puente Colgante, Mex.	24-Mar	19-Mar	13-Mar	2-Oct	15-Oct	29-Oct	191	209	229	215
15117	Temascalcingo, Mex.	30-Mar	25-Mar	20-Mar	23-Sep	3-Oct	14-Oct	176	191	207	196
15122	Tenango, Mex.	10-Jun	18-May	22-Abr	25-Ago	10-Sep	28-Sep	75	114	158	140
15126	Toluca (Obs.), Mex.	17-May	8-May	26-Abr	2-Oct	10-Oct	19-Oct	137	154	175	166
15128	Tultenango, Mex.	29-Abr	13-Abr	25-Mar	25-Sep	8-Oct	21-Oct	148	177	209	196
15145	Plan Lago de Texcoco, Mex.	29-Mar	20-Mar	10-Mar	9-Oct	22-Oct	5-Nov	193	215	239	225
15158	San Pedro de Los Baños, Mex.	8-May	27-Abr	14-Abr	21-Sep	2-Oct	15-Oct	135	157	183	170
15160	Santiago del Monte, Mex.	14-Abr	7-Abr	29-Mar	2-Oct	13-Oct	26-Oct	170	188	210	197
15170	Chapingo (DGE), Mex.	25-Mar	13-Mar	28-Feb	10-Oct	22-Oct	5-Nov	198	222	249	235
15185	Presa El Molino, Mex.	19-Abr	7-Abr	24-Mar	2-Sep	18-Sep	5-Oct	135	163	194	177
15187	Presa Huapango, Mex.	21-May	7-May	20-Abr	28-Sep	9-Oct	21-Oct	129	154	183	171
15189	La Concepción, Mex.	17-Abr	11-Abr	4-Abr	26-Sep	7-Oct	19-Oct	161	178	197	185
15190	Presa San Ildefonso, Mex.	27-Mar	18-Mar	7-Mar	29-Sep	12-Oct	27-Oct	185	207	233	218
15197	Cuesta del Carmen, Mex.	30-May	2-May	1-Abr	8-Sep	24-Sep	12-Oct	100	144	193	175
15199	Mina Vieja, Mex.	11-Jun	11-May	9-Abr	18-Ago	8-Sep	1-Oct	67	119	174	151
15201	Trojes, Mex.	2-May	23-Abr	11-Abr	29-Sep	10-Oct	22-Oct	149	169	193	181
15203	Calixtlahuaca, Mex.	3-May	25-Abr	16-Abr	15-Sep	27-Sep	10-Oct	134	154	176	163
15217	San Juan Acazuchitlán, Mex.	20-Mar	11-Mar	1-Mar	15-Oct	27-Oct	8-Nov	208	229	251	239
15231	Presa Iturbide, Mex.	24-Jun	17-Jun	9-Jun	18-Jul	4-Ago	24-Ago	23	47	75	55
15233	San Nicolás Mavati, Mex.	30-Abr	7-Abr	14-Mar	18-Sep	2-Oct	18-Oct	140	177	217	201
15238	Santa María del Llanom, Mex.	14-May	8-May	30-Abr	28-Sep	8-Oct	19-Oct	136	152	171	160
15239	San Antonio Trojes, Mex.	7-Jun	26-May	12-May	11-Sep	24-Sep	9-Oct	95	120	149	134
15240	San Francisco Putla, Mex.	22-Abr	8-Abr	24-Mar	24-Sep	7-Oct	22-Oct	154	181	211	196
15244	Muyteje, Mex.	15-May	20-Abr	25-Mar	7-Oct	20-Oct	4-Nov	144	182	223	208
15245	La Jordana, Mex.	15-Abr	7-Abr	27-Mar	20-Sep	5-Oct	21-Oct	157	180	207	191
15251	Atlacomulco II (DGE), Mex.	6-May	29-Abr	19-Abr	29-Sep	8-Oct	17-Oct	145	161	180	171
15256	Ocuilan E-23, Mex.	3-May	8-Abr	14-Mar	9-Ago	31-Ago	26-Sep	97	144	195	169
15260	San Lucas Totolmaloya, Mex.	4-Abr	26-Mar	15-Mar	12-Oct	24-Oct	7-Nov	190	211	236	222
15261	El Jazmín, Mex.	23-Abr	13-Abr	31-Mar	10-Sep	25-Sep	11-Oct	139	164	193	177
15264	Buenos Aires, Mex.	30-Abr	22-Abr	13-Abr	23-Sep	6-Oct	19-Oct	145	166	188	175
15266	Codagem, Mex.	4-May	27-Abr	17-Abr	19-Sep	29-Sep	10-Oct	137	154	175	164
15267	Chichilpa, Mex.	23-Mar	14-Mar	3-Mar	20-Ago	9-Sep	1-Oct	149	178	211	189
15282	Tres Barrancas, Mex.	6-May	30-Abr	23-Abr	1-Oct	9-Oct	18-Oct	147	161	177	168
15301	Texcaltitlán D-7, Mex.	12-Abr	29-Mar	13-Mar	25-Oct	4-Nov	15-Nov	195	219	246	235
15315	Caseta EPCCA, Mex.	6-May	28-Abr	18-Abr	11-Oct	21-Oct	1-Nov	157	175	196	185
15317	San José Epifanía, Mex.	7-Jun	20-May	30-Abr	29-Ago	15-Sep	3-Oct	82	117	155	137
15333	El Palmito, Mex.	24-Jul	8-Jul	18-Jun	6-Jun	30-Jun	30-Jul	0	0	41	11
15341	San Antonio Nixini, Mex.	8-Jun	24-May	5-May	11-Ago	30-Ago	20-Sep	63	97	137	116

## 5.2. Estimación de la fecha de la última helada (UH), primera helada (PH)

**Cuadro 5.4:** Fechas de Ocurrencia de la Última y Primera Helada y Periodo Libre de Heladas en el estado de Michoacán, Morelos

ID	Lugar	Última Helada			Primera Helada			PLH (días)			
		5%	10%	20%	5%	10%	20%	5-5%	10-10%	20-20%	20-10%
16014	Camécuaro, Mich.	2-Abr	16-Mar	27-Feb	27-Oct	5-Nov	16-Nov	207	233	261	250
16016	Carrillo Puerto, Mich.	15-Mar	4-Mar	20-Feb	18-Oct	30-Oct	11-Nov	216	239	263	251
16017	Casa Blanca, Mich.	4-Mar	23-Feb	13-Feb	7-Nov	17-Nov	26-Nov	247	266	285	276
16020	Ciudad Hidalgo (DGE), Mich.	30-Mar	19-Mar	7-Mar	30-Oct	10-Nov	22-Nov	213	235	259	247
16052	Huingo, Mich.	2-Abr	21-Mar	7-Mar	16-Oct	28-Oct	11-Nov	196	220	248	234
16087	Patzcuaro, Mich.	6-Abr	25-Mar	10-Mar	16-Oct	29-Oct	12-Nov	192	217	246	232
16091	Álvaro Obregón (DGE), Mich.	1-Abr	17-Mar	28-Feb	16-Oct	29-Oct	11-Nov	197	225	255	242
16105	Quiro, Mich.	10-Abr	21-Mar	1-Mar	15-Nov	22-Nov	30-Nov	218	245	273	265
16111	San José, Mich.	27-Mar	15-Mar	2-Mar	23-Oct	29-Nov	5-Dic	240	258	277	271
16118	Santa Fe, Mich.	15-Abr	5-Abr	23-Mar	9-Oct	21-Oct	3-Nov	176	198	224	211
16120	Santiago Undameo, Mich.	17-Abr	2-Abr	17-Mar	10-Oct	23-Oct	5-Nov	175	203	232	219
16124	Temascales, Mich.	17-Abr	12-Abr	5-Abr	28-Sep	8-Oct	18-Oct	163	178	195	185
16137	Urepetiro, Mich.	8-Mar	26-Feb	16-Feb	9-Dic	13-Dic	16-Dic	275	289	302	299
16225	Villa Jiménez II, Mich.	27-Mar	18-Mar	6-Mar	25-Sep	10-Oct	27-Oct	181	205	234	217
16235	Huajúmbaro, Mich.	21-May	15-May	6-May	25-Sep	5-Oct	15-Oct	126	142	161	151
16255	Ucareo, Mich.	11-Jul	7-Jun	2-May	29-Jun	26-Jul	27-Ago	0	48	116	84
17021	Tlacualera, Mor.	19-Mar	8-Mar	23-Feb	26-Oct	6-Nov	17-Nov	220	242	266	255
17046	Hueyapan E-4, Mor.	21-Mar	14-Mar	4-Mar	20-Oct	30-Oct	10-Nov	212	229	250	239
17047	Huitzilac, Mor.	5-May	19-Abr	1-Abr	7-Oct	20-Oct	2-Nov	154	183	214	201

**Cuadro 5.5:** Fechas de Ocurrencia de la Última y Primera Helada y Periodo Libre de Heladas en el estado de Puebla y Querétaro

ID	Lugar	Última Helada			Primera Helada			PLH (días)			
		5%	10%	20%	5%	10%	20%	5-5%	10-10%	20-20%	20-10%
21007	Ahuatepec, Pue.	16-Abr	23-Mar	26-Feb	10-Nov	19-Nov	28-Nov	207	240	274	265
21016	Balcón Diablo, Pue.	10-Mar	28-Feb	16-Feb	21-Oct	31-Oct	11-Nov	224	244	267	256
21021	Capuluaque (CFE), Pue.	20-Abr	6-Abr	20-Mar	24-Oct	5-Nov	17-Nov	186	212	241	229
21034	Echeverría, Pue.	11-Abr	31-Mar	17-Mar	8-Oct	20-Oct	2-Nov	179	202	229	216
21035	Puebla (DGE), Pue.	14-Mar	4-Mar	22-Feb	5-Nov	14-Nov	24-Nov	235	254	274	264
21040	Guadalupe Buenavista, Pue.	22-May	10-May	26-Abr	18-Sep	30-Sep	12-Oct	118	142	168	156
21047	Ixtacamaxtitlán (CFE), Pue.	3-May	19-Abr	2-Abr	4-Sep	20-Sep	8-Oct	123	153	188	170
21052	Alchichica, Pue.	11-May	1-May	20-Abr	12-Sep	24-Sep	6-Oct	123	145	168	156
21060	Palmar de Bravo, Pue.	30-May	15-May	27-Abr	31-Jul	20-Ago	13-Sep	61	96	138	114
21069	San Antonio Arroyo Prieto, Pue.	11-Abr	2-Abr	21-Mar	20-Sep	3-Oct	18-Oct	161	183	210	195
21080	San Salvador El Seco, Pue.	6-Jul	17-Jun	25-May	12-Jun	6-Jul	2-Ago	0	18	68	41
21081	Santa Cruz Coyotepec, Pue.	5-Jun	26-May	13-May	4-Jul	22-Jul	13-Ago	28	56	91	69
21082	Tecamachalco, Pue.	5-Abr	28-Mar	19-Mar	28-Sep	11-Oct	25-Oct	175	196	219	205
21083	Tehuacán, Pue.	14-Mar	1-Mar	16-Feb	23-Oct	3-Nov	15-Nov	222	246	271	259
21091	Teziutlán, Pue.	31-Mar	19-Mar	6-Mar	30-Nov	5-Dic	10-Dic	243	260	278	273
21102	Xochitlán Todos Santos, Pue.	10-Jun	6-May	31-Mar	4-Ago	27-Ago	23-Sep	54	112	175	148
21103	Zacapoaxtla (SMN), Pue.	16-Mar	3-Mar	18-Feb	21-Oct	2-Nov	14-Nov	218	243	268	256
21111	Santiago Zautla (CFE), Pue.	27-Abr	7-Abr	16-Mar	21-Sep	6-Oct	23-Oct	146	181	220	203
21117	Guadalupe Victoria, Pue.	25-Abr	16-Abr	4-Abr	22-Sep	4-Oct	18-Oct	149	170	196	182
21119	Libres (SMN), Pue.	18-Abr	8-Abr	28-Mar	20-Sep	3-Oct	16-Oct	154	177	201	188
21126	Loma Alta (CFE), Pue.	16-Abr	7-Abr	28-Mar	16-Sep	1-Oct	19-Oct	152	176	204	186
22004	El Batán, Qro.	21-Mar	5-Mar	17-Feb	22-Oct	2-Nov	14-Nov	214	241	269	257
22005	El Doctor, Qro.	3-Abr	25-Mar	14-Mar	14-Oct	26-Oct	8-Nov	193	214	238	225
22022	San Juan del Río (DGE), Qro.	26-Mar	14-Mar	1-Mar	16-Oct	29-Oct	13-Nov	203	228	256	241
22024	Tres Lagunas, Qro.	21-Mar	13-Mar	2-Mar	18-Oct	30-Oct	12-Nov	210	230	254	241
22025	Presa Centenario, Qro.	9-Abr	25-Mar	9-Mar	23-Sep	8-Oct	24-Oct	166	196	228	212
22029	Huimilpan, Qro.	3-Abr	23-Mar	10-Mar	26-Sep	10-Oct	26-Oct	175	200	229	213
22031	Presa Paso de Tablas, Qro.	30-Mar	19-Mar	6-Mar	1-Oct	14-Oct	29-Oct	184	208	236	221
22033	San Pablo, Qro.	9-Abr	1-Abr	23-Mar	27-Sep	10-Oct	25-Oct	170	191	215	200
22035	Vizarrón, Qro.	5-Abr	28-Mar	18-Mar	1-Nov	11-Nov	21-Nov	209	227	247	237
22047	Presa El Capulín, Qro.	14-Abr	26-Mar	5-Mar	8-Oct	22-Oct	5-Nov	176	209	244	230

## 5.2. Estimación de la fecha de la última helada (UH), primera helada (PH)

**Cuadro 5.6:** Fechas de Ocurrencia de la Última y Primera Helada y Periodo Libre de Heladas en el estado de Tlaxcala

ID	Lugar	Última Helada			Primera Helada			PLH (días)			
		5 %	10 %	20 %	5 %	10 %	20 %	5-5 %	10-10 %	20-20 %	20-10 %
29002	Apizaco, Tlax.	27-Abr	15-Abr	31-Mar	15-Sep	29-Sep	14-Oct	140	166	196	181
29003	Atlanga San Jose, Tlax.	3-May	24-Abr	13-Abr	20-Sep	1-Oct	12-Oct	139	159	181	170
29007	El Carmen, Tlax.	19-May	9-May	25-Abr	25-Ago	10-Sep	27-Sep	97	123	154	137
29011	Huamantla, Tlax.	14-May	1-May	16-Abr	13-Sep	26-Sep	10-Oct	121	147	176	162
29025	San Marcos Huaquilpan, Tlax.	6-May	24-Abr	9-Abr	6-Sep	21-Sep	8-Oct	122	149	181	164
29026	Zitlaltepec, Tlax.	17-Abr	11-Abr	2-Abr	29-Ago	14-Sep	1-Oct	133	155	181	164
29030	Tlaxcala de Xicohténcatl, Tlax.	25-Mar	13-Mar	28-Feb	11-Oct	24-Oct	7-Nov	199	224	251	237
29032	Tlaxco, Tlax.	19-Abr	8-Abr	25-Mar	24-Sep	6-Oct	19-Oct	157	180	207	194
29034	Zoquiapan, Tlax.	29-Abr	21-Abr	12-Abr	29-Jul	16-Ago	5-Sep	90	116	145	125
29040	Ixtacuixtla, Tlax.	27-Abr	17-Abr	5-Abr	29-Sep	11-Oct	24-Oct	154	176	201	188
29041	Tepetitla, Tlax.	22-May	10-May	25-Abr	2-Oct	12-Oct	23-Oct	132	154	180	169
29042	Amaxac de Guerrero, Tlax.	9-Abr	31-Mar	20-Mar	17-Sep	1-Oct	17-Oct	160	183	210	194
29047	Españita, Tlax.	20-Mar	11-Mar	1-Mar	8-Oct	21-Oct	4-Nov	201	223	247	233
29051	Toluca de Guadalupe, Tlax.	13-Mar	3-Mar	20-Feb	5-Oct	19-Oct	3-Nov	205	229	255	240
29052	El Rosario, Tlax.	29-May	15-May	27-Abr	5-Ago	23-Ago	12-Sep	67	99	137	117
29053	Terrenate, Tlax.	3-Abr	22-Mar	8-Mar	24-Sep	7-Oct	23-Oct	173	198	228	212
29151	Altzayanca, Tlax.	20-May	7-May	21-Abr	2-Sep	18-Sep	7-Oct	104	133	168	149

### 5.2.1. Mapas de riesgo: Últimas y Primeras Heladas

Las Figuras 5.2, 5.3, y 5.4 corresponden a los mapas que describen las fechas de ocurrencia de la última helada, con probabilidades de riesgo de ocurrencia después de dichas fechas de 5, 10, y 20 % respectivamente, usando como modelo la distribución Weibull. La zona de estudio es clasificada cada 15 días de acuerdo con la fecha en que se presenta la última helada, representando una tendencia hacia el color azul cuando las heladas son mas tardías y una tendencia al rojo en zonas de menor riesgo. Del mismo modo, las Figuras 5.7, 5.10 y 5.8 indican las fechas de ocurrencia de las primeras heladas, pero en este caso, se consideran los riesgos de ocurrencia de una helada antes de las fechas indicadas.

#### Últimas Heladas

Analizando la distribución espacial de las fechas de ocurrencia de las últimas heladas, se observó que para una probabilidad de ocurrencia de 5 %, sobresalen las áreas con mayor riesgo (Figura 5.2), cuyo tamaño disminuye a medida que se aumenta el nivel de riesgo.

En Figura 5.4, se observa una zonificación del área de estudio de acuerdo a la fecha de ocurrencia de las últimas heladas, en ese sentido, considerando que en el Estado de México las fechas de siembra del cultivo de maíz del ciclo P-V, se distribuyen entre los meses de abril y mayo, se muestra en color amarillo aquellas áreas en donde con una probabilidad del 20 % se pueden esperar heladas tardías después del 15 de abril, fecha en la que de acuerdo con SARH-INIA-CAETECA (1982), es la fecha de siembra para variedades tardías en la Región Valles Altos. Del mismo modo, existe un 20 % de probabilidad de que ocurra una helada después del 30 de abril en la áreas señalada en color verde claro, es este caso normalmente se utilizan las variedades intermedias.

## 5.2. Estimación de la fecha de la última helada (UH), primera helada (PH)

En el estado de México, las estaciones que reportaron las heladas más tardías son El Nevado de Toluca, Palizada Villa Victoria, El Palmito en Timilpan, San Lorenzo Malacota Morelos, Presa Iturbide en Isidro Fabela y La Marquesa Ocoyoacac, donde aún después del 14 de junio se tiene hasta un 20 % de riesgo.

El siguiente tono de color verde, indica que para el mismo nivel de riesgo máximo la fecha de siembra recomendada es hasta después del 15 de mayo, lo cual implica un periodo de crecimiento disponible muy corto, por lo que se recomienda usar variedades precoces para evitar la incidencia de heladas tempranas. Es importante señalar, que la fecha de la primera helada no es determinante para seleccionar una variedad, ya que esto dependerá de principalmente del periodo libre de heladas como se describirá mas adelante. La estimación de las fechas de las últimas heladas dentro de cierto límites de riesgo admisibles, es de suma importancia para determinar la fechas de siembra con el propósito de disminuir el riesgo de impacto de una helada tardía.

Por otro lado, en el Estado de México, se observó que existe estrecha relación entre la localización de las áreas con el 20 % de probabilidad de ocurrencia de heladas tardías después del 15 de mayo y la distribución geográfica de la temperatura media cuando ésta es menor o igual a 12°C (Ver Anexo B.2). Dicha región, también coincide con los sitios de mayor altitud, abarcando las principales regiones montañosas del estado: El Nevado de Toluca, la cordillera que va desde el Cerro La Corona hasta el Cerro Las Palomas, los Cerros Jocotitlán, Las Ánimas y La Guadalupeana. Por lo tanto, se midió la correlación entre las fechas de ocurrencia de las últimas heladas y la altitud, resultando ser positiva entre 0.57 y 0.6, en contraste, se obtuvo una correlación negativa con la ocurrencia de las primeras heladas y el periodo libre de heladas (Figura 5.6).

Para la elaboración de mapas de probabilidad de ocurrencia de heladas tardías y tempranas Mora (2015) considera la influencia del gradiente altitudinal, usando en un método de regresión lineal simple detallado por Fries *et al.* (2012), quien en su trabajo ajusta modelos de regresión lineal con coeficientes de determinación  $R^2$  entre 0.7 y 0.99. En este estudio, si bien existe cierta correlación entre las fechas de las últimas heladas y la altitud, dada la gran dispersión de las fechas de las primeras y últimas heladas y del periodo libre de heladas, no se encontraron modelos de regresión significativos, ya que en la mayoría de los casos se obtuvieron valores de  $R^2 \leq 0.3$ , por lo que, no se consideró el gradiente altitudinal en la modelación espacial de dichas variables.

Cabe mencionar que en el área aledaña al Iztaccíhuatl y al Popocatepetl no se identificaron estaciones meteorológicas suficientes para realizar estimaciones con mayor precisión de tal forma que éstas concuerden con la altitud de esta zona. En estos casos, cuando se desea estudiar una zona que no cuente con estaciones con al menos el 80 % de datos en 30 años, de acuerdo con Grassi *et al.* (1986) se pueden considerar como estaciones auxiliares aquellas que cuenten con series de entre 15 y 20 años de datos.

## 5.2. Estimación de la fecha de la última helada (UH), primera helada (PH)

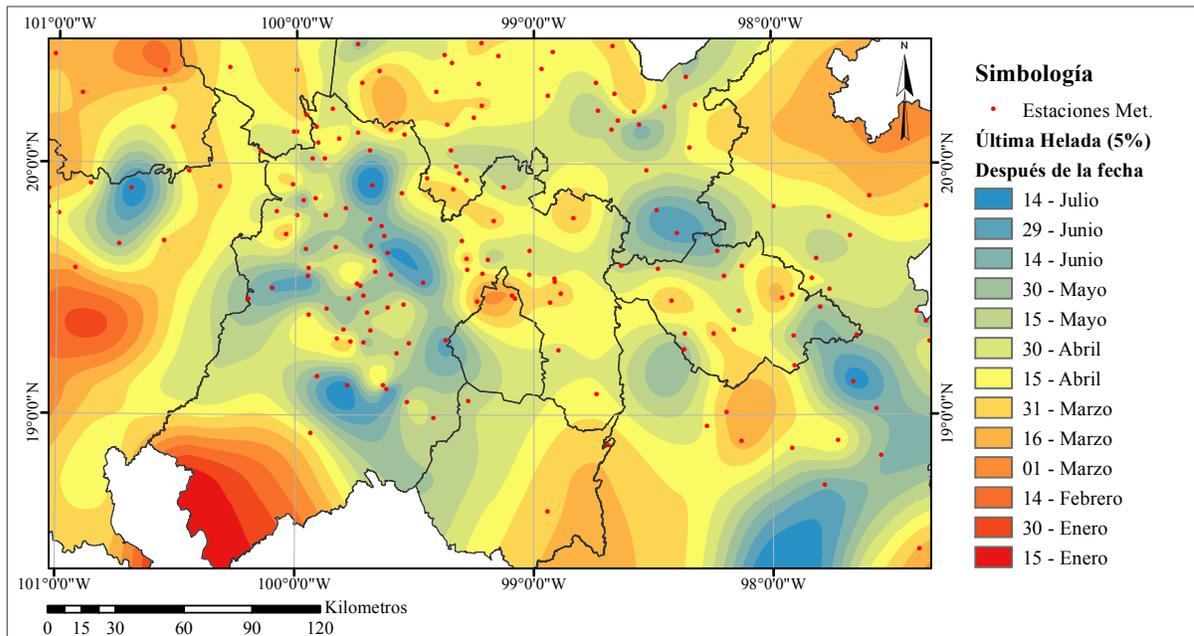


Figura 5.2: Mapa de riesgo ocurrencia de heladas tardías con probabilidad del 5%, modelado con la distribución Weibull.

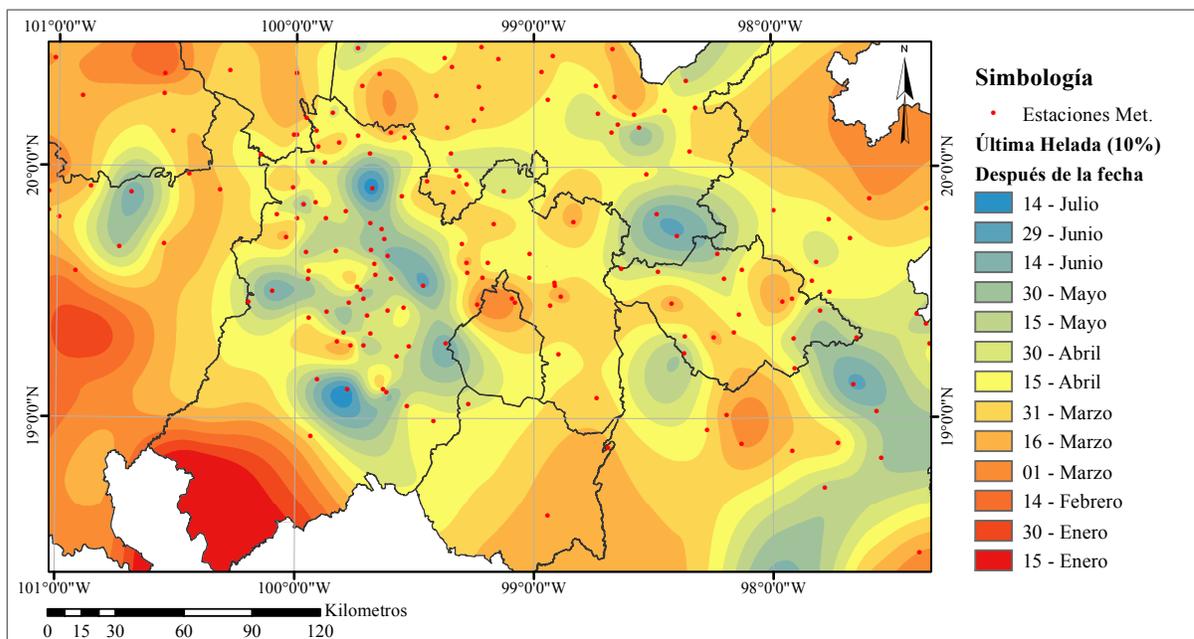


Figura 5.3: Mapa de riesgo de ocurrencia de heladas tardías con probabilidad del 10%, modelado con la distribución Weibull.

## 5.2. Estimación de la fecha de la última helada (UH), primera helada (PH)

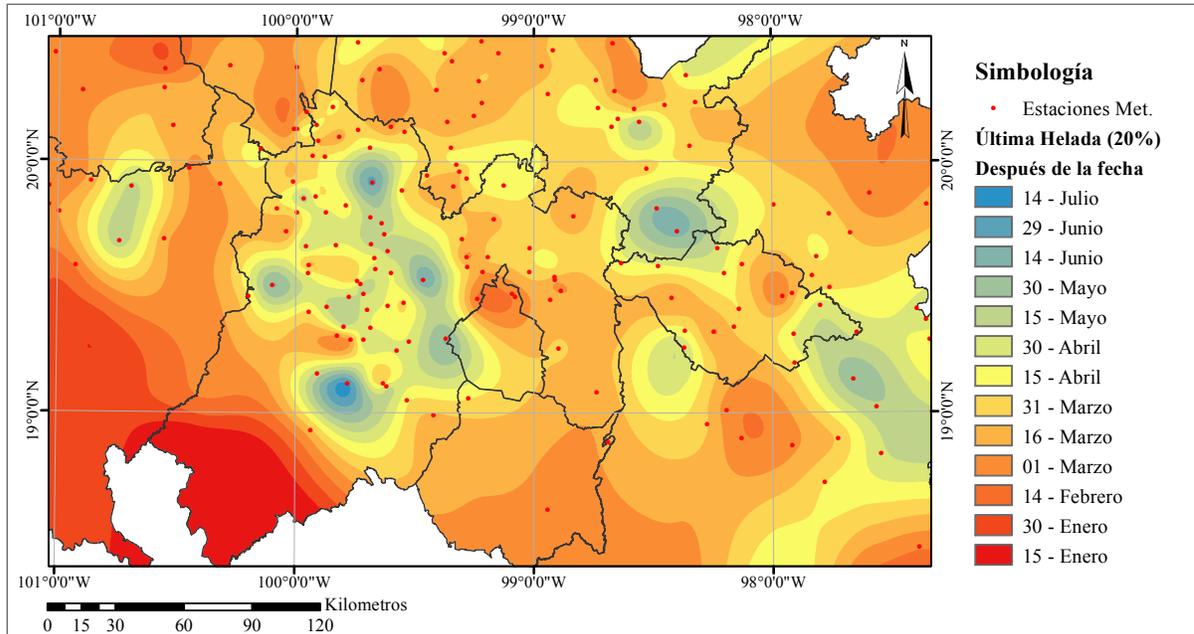


Figura 5.4: Mapa de riesgo de ocurrencia de heladas tardías con probabilidad del 20 %, modelado con la **Distribución Weibull**.

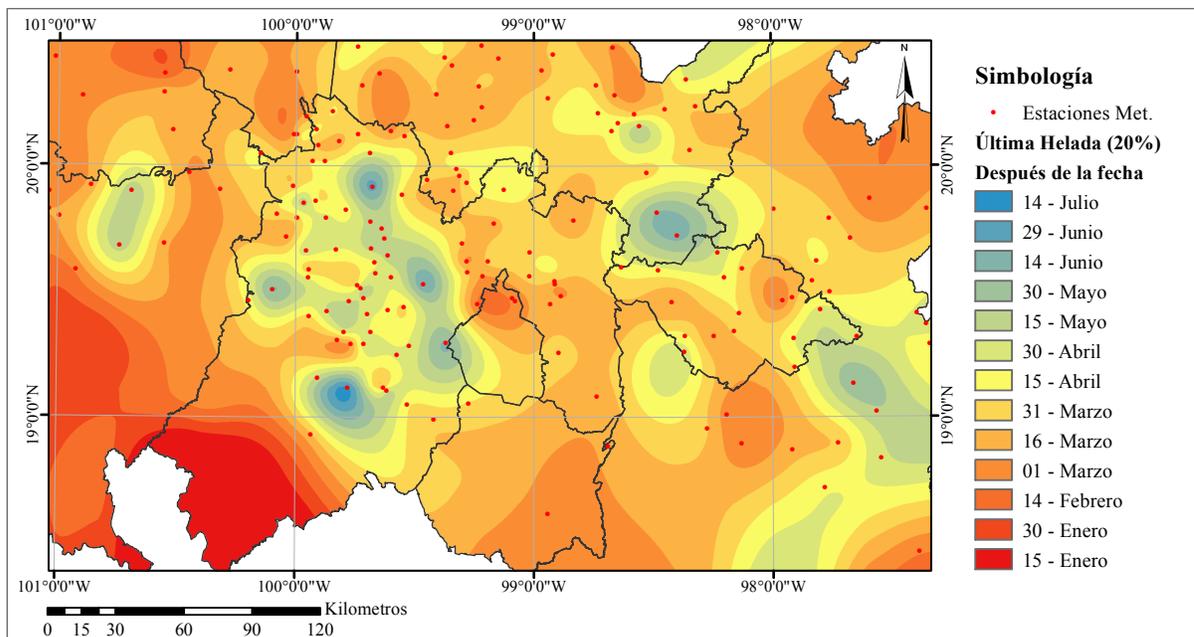
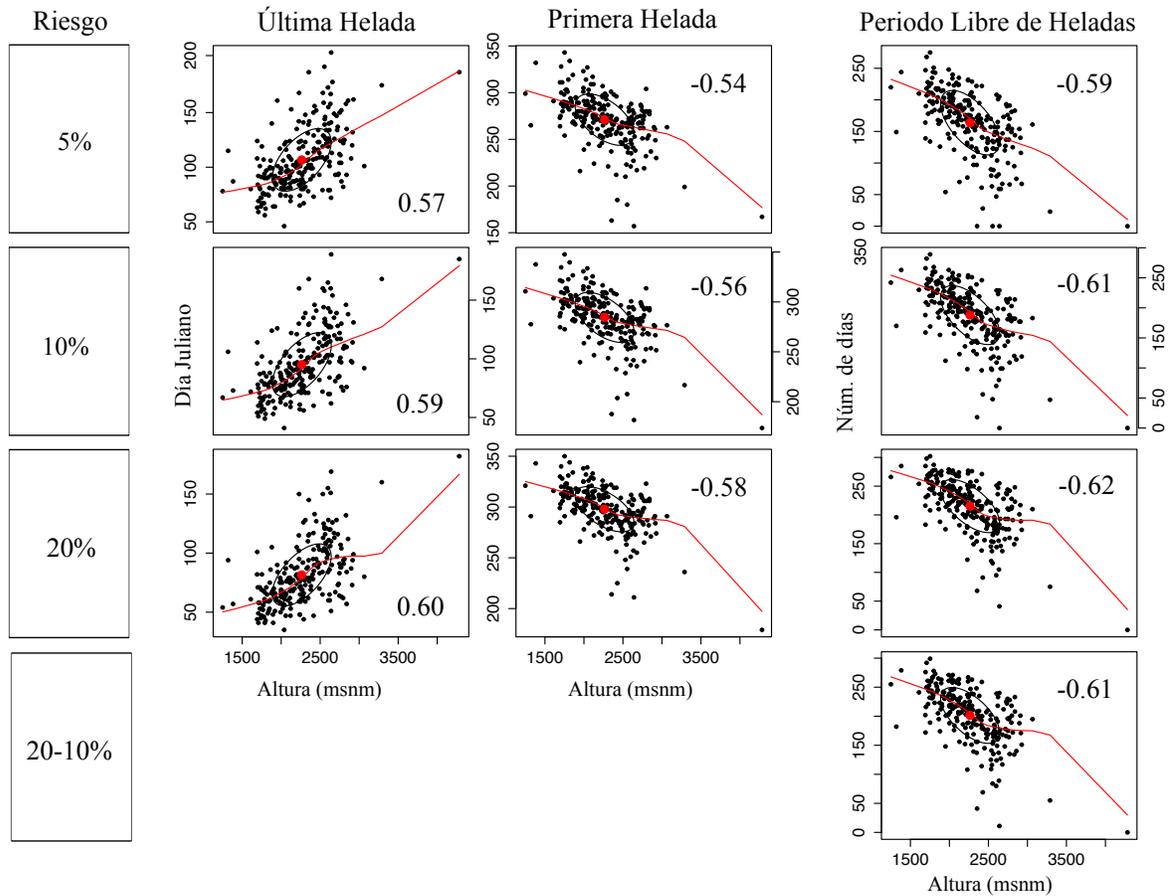


Figura 5.5: Mapa de riesgo de ocurrencia de heladas tardías con probabilidad del 20 %, modelado con la **Distribución Normal**.

## 5.2. Estimación de la fecha de la última helada (UH), primera helada (PH)



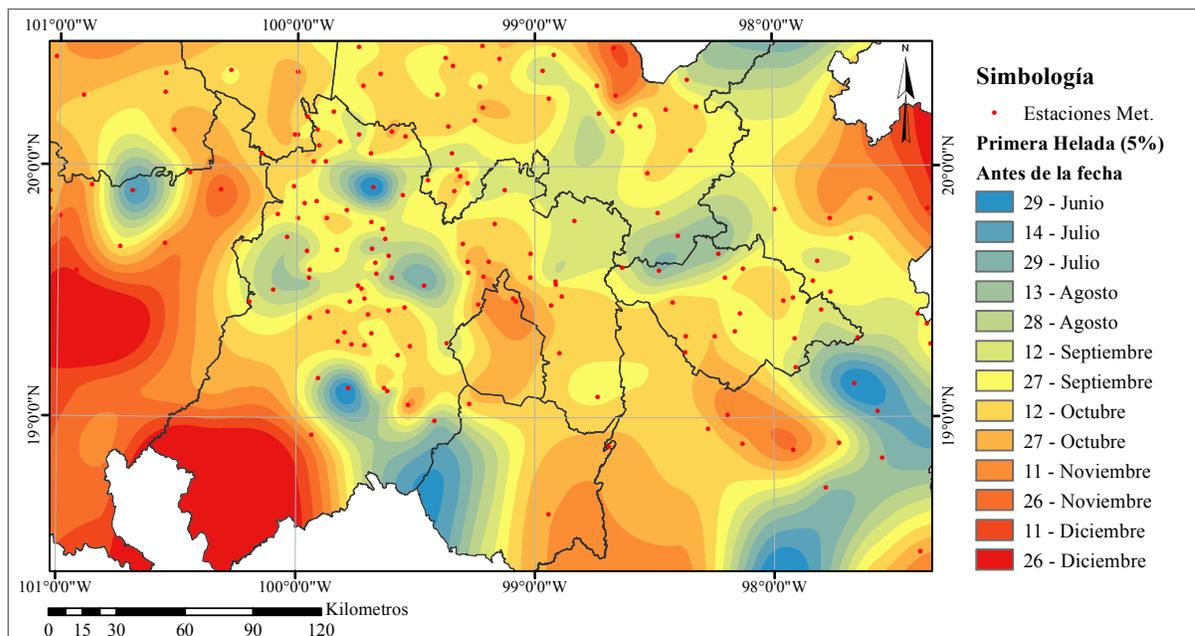
**Figura 5.6:** Dispersión y correlación entre la ocurrencia de la última y primera helada, el periodo libre de heladas y la altitud.

## 5.2. Estimación de la fecha de la última helada (UH), primera helada (PH)

### Primeras Heladas

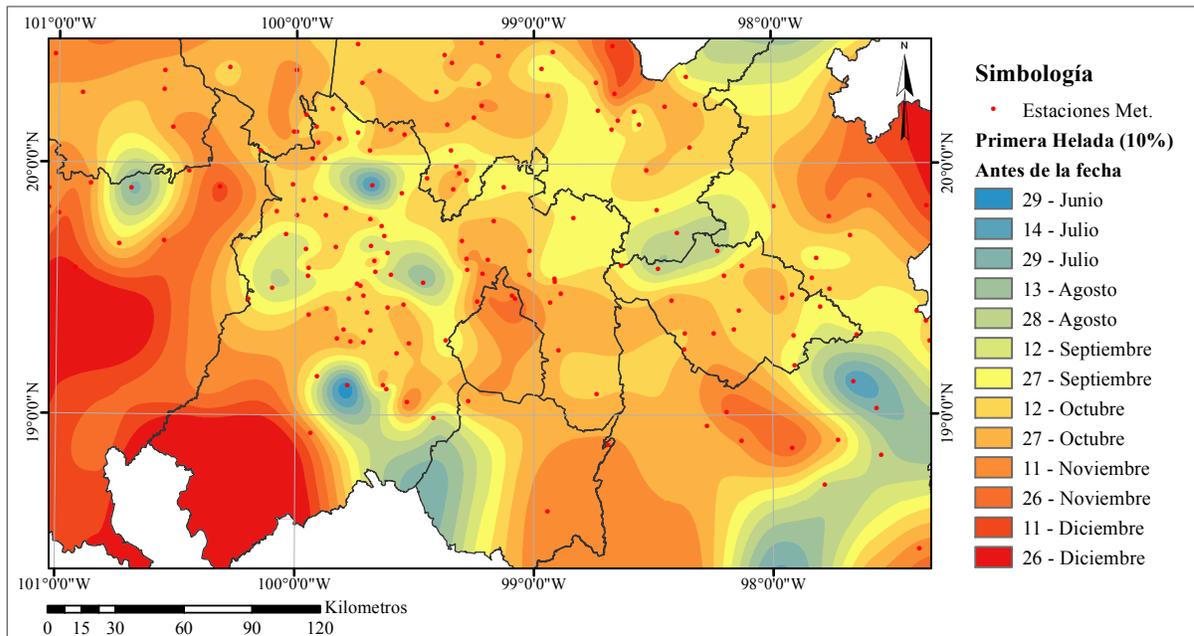
De acuerdo con la Figura 5.7, al norte de los estados de México y Tlaxcala, se identificó una región donde se presentan heladas tempranas con probabilidad del 5% antes del 12 de septiembre, es decir, al menos una vez cada 20 años, lo cual en la agricultura es aceptable, sin embargo, el cultivo de maíz puede llegar a tolerar hasta un 10% de riesgo, que equivale a la ocurrencia de una helada temprana cada 10 años, de esta manera, el área de riesgo de ocurrencia de una helada antes de dicha fecha disminuye como se muestra en la Figura 5.8, en donde se puede observar que en el Estado de México se distinguen las áreas representadas por las estaciones meteorológicas ubicadas en El Nevado de Toluca, Timilpa, Jipilco, Presa Iturbide y Villa Victoria.

Cuando se tolera una probabilidad de ocurrencia 20%, las áreas de mayor riesgo disminuyen notablemente (Figura 5.10) concentrándose en los alrededores de El Nevado de Toluca, Timilpan y la Presa Iturbide en el Estado de México. Del mismo modo, al noroeste de Tlaxcala, se localiza una zona delimitada entre Zoquiapan, El Rosario y la Presa Tezoyo en Apan, Hidalgo. Otras regiones con riesgo del 20% de heladas tardías después del 12 de septiembre, fueron identificadas en Ucareo, Michoacán y en San Salvador El Seco, Puebla.

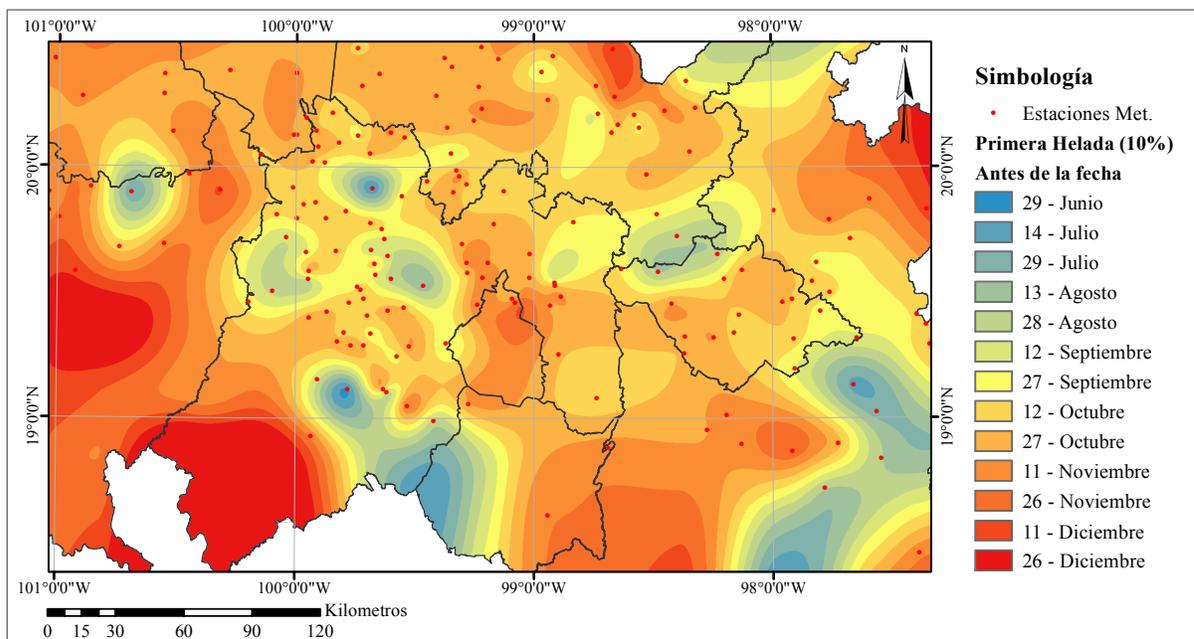


**Figura 5.7:** Mapa de riesgo de ocurrencia de heladas tempranas con probabilidad del 5%, modelado con la distribución Weibull.

## 5.2. Estimación de la fecha de la última helada (UH), primera helada (PH)

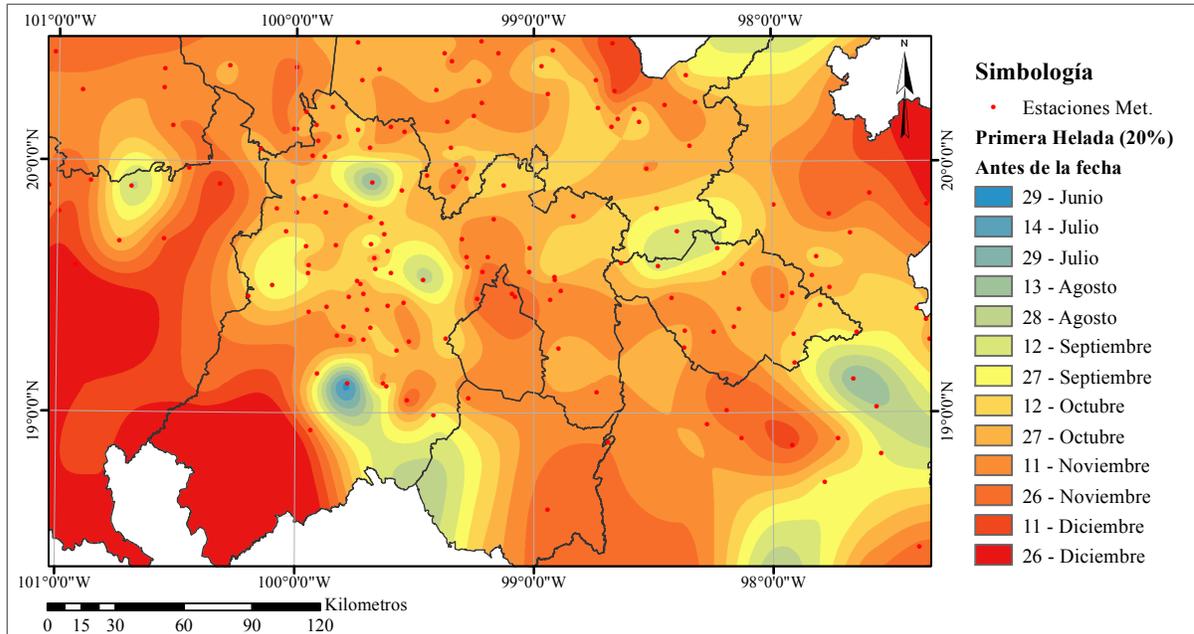


**Figura 5.8:** Mapa de riesgo de ocurrencia de heladas tempranas con probabilidad del 10%, modelado con la **Distribución Weibull**.



**Figura 5.9:** Mapa de riesgo de ocurrencia de heladas tempranas con probabilidad del 10%, modelado con la **Distribución Normal**.

## 5.2. Estimación de la fecha de la última helada (UH), primera helada (PH)



**Figura 5.10:** Mapa de riesgo de ocurrencia de heladas tempranas con probabilidad del 20 %, modelado con la distribución Weibull.

### Modelo Weibull vs Normal

Considerando los riesgos de heladas máximos permisibles en el cultivo del maíz, se presentan también las Figuras 5.5 y 5.9 que corresponden a los mapas de ocurrencia de la última y la primera helada con riesgo de 20 y 10 % respectivamente, pero a diferencia de las Figuras 5.4 y 5.8, la modelación se realizó utilizando el Método de Thom que se basa en la distribución Normal. Al comparar gráficamente estos mapas, se observa que existen algunas diferencias en la distribución espacial de las fechas de ocurrencia de las primeras heladas estimadas con ambos modelos. Por su parte, las diferencias gráficas en los mapas de las últimas heladas, son poco perceptibles. Por lo tanto, se realizó una comparación basada en la media de las diferencias de las variables estimadas con la distribución Normal menos las estimadas con la distribución Weibull, que se presenta en el Cuadro 5.7, donde se observa el número de días que se adelanta o se atrasa una fecha estimada con la distribución Normal respecto a la estimada con la Weibull, también se presenta el número de días que la distribución Normal suma o resta al periodo libre de heladas estimado.

**Cuadro 5.7:** Diferencia (días) de estimaciones del modelo Normal respecto al Weibull

	Última Helada			Primera Helada			Periodo Libre de Heladas			
	5 %	10 %	20 %	5 %	10 %	20 %	5-5 %	10-10 %	20-20 %	20-10 %
Media	-4.3	-1.9	+0.4	+5.3	+1.6	-1.4	+9.1	+3.4	-1.8	+1.2
Desv. Estandar	4.8	2.1	1.8	6.3	5.0	3.6	8.3	5.4	4.4	5.8

## 5.2. Estimación de la fecha de la última helada (UH), primera helada (PH)

### 5.2.2. Mapas de riesgo: Periodo Libre de Helada

Conocer la duración del Periodo Libre de Heladas (PLH) a diferentes niveles de riesgo en una región es de vital importancia para la producción de maíz, ya que junto con la fecha estimada de la última helada, permiten al productor seleccionar la semilla para siembra de acuerdo con su ciclo vegetativo de tal forma que se garantice la producción dentro de ciertos límites de riesgo aceptables, usando variedades tardías cuando el PLH es mayor a los 175 días, variedades intermedias cuando se tiene entre 160 y 175 días libres de heladas y, en casos más extremos, usar variedades precoces cuando el PLH es menor a 160 días.

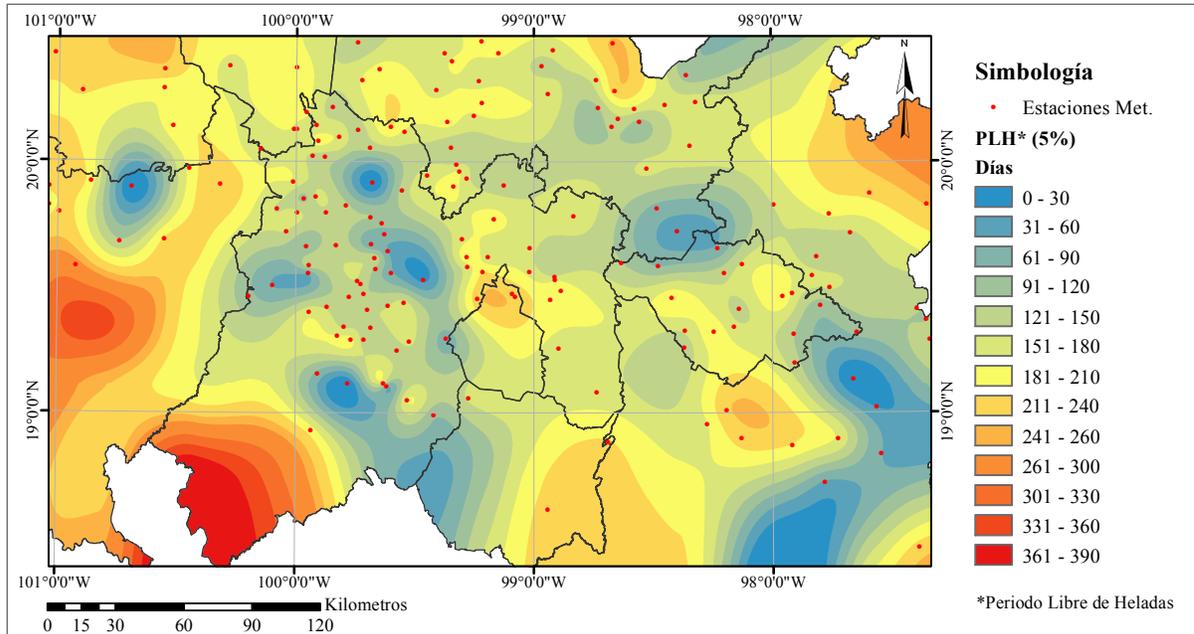
En este contexto, en la Figura 5.11, el color verde claro señala la distribución espacial de las zonas que tienen entre 151 y 180 días libres de heladas con un 95 % de confiabilidad, lo cual corresponde al menor riesgo de siniestro por heladas. El gradiente de color que va del amarillo al rojo también señala a las zonas donde se tienen PLH mayores a 180 días hasta lugares donde prácticamente las heladas no son muy comunes.

Con base en el margen de riesgo agrónomicamente óptimo para el cultivo del maíz, se presenta la distribución espacial del  $PLH_{20-10}$  en la Figura 5.13, donde es posible notar que las áreas con mayor limitación respecto al número de días libres de heladas se localizan en las zonas aledañas al Nevado de Toluca, Palizada, El palmito Timilpan, Presa Iturbide y La Marquesa en Ocoyoacac, que presentan un PLH inferior a los 90 días, estos resultados concuerdan parcialmente con los obtenidos por Pájaro y Ortíz (1992), quienes caracterizan las regiones aledañas al Nevado de Toluca y la cordillera que va desde La Marquesa hasta Presa El Tigre con un PLH menor a 94 días. En ese sentido, éste método permitió identificar otras áreas de alto riesgo.

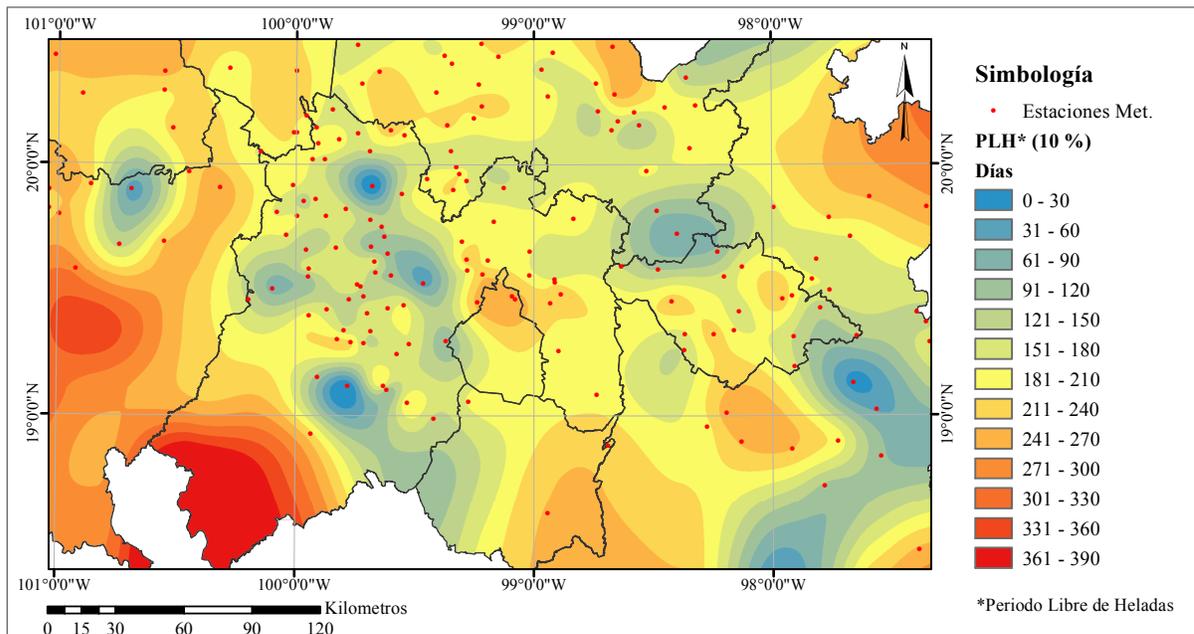
En la Figura 5.13, también se observa que las áreas con condiciones favorables para el completo desarrollo del cultivo del maíz se localizan en las zonas marcadas en colores que van del amarillo hasta el rojo, ya éstas presentan PLH mayores a 180 días. Por otro lado, una región de particular interés, está conformada por los municipios de San José del Rincón, San Felipe del Progreso, Ixtlahuaca, Jocotitlán que son los principales productores de maíz en el estado, y donde se observa que el periodo libre de heladas oscila entre 150 y 180 días, periodo suficiente para el desarrollo de variedades de maíz intermedias y tardías, sin embargo, tiende a disminuir en la frontera norte del municipio de Villa Victoria que reporta hasta menos de 150 días sin heladas, lo cual implica que los productores de esta zona deben tomar medidas de prevención pasiva como la adecuada selección de fechas de siembra y variedades que se adapten a los periodos libres de heladas. Como opciones alternas para cultivos de ciclo largo, se podría admitir un nivel de riesgo de hasta el 25 o 30 % en la estimación de las fechas de primeras heladas, pero no se recomienda ampliar el nivel de riesgo en la estimaciones de las últimas heladas dada su alta peligrosidad e implicaciones económicas.

Adicionalmente, en el Cuadro 5.3, se presentan los  $PLH_{(5-5)}$ ,  $PLH_{(10-10)}$  y  $PLH_{(20-20)}$  como referencia para otros cultivos de mayor o menor sensibilidad a las heladas.

## 5.2. Estimación de la fecha de la última helada (UH), primera helada (PH)



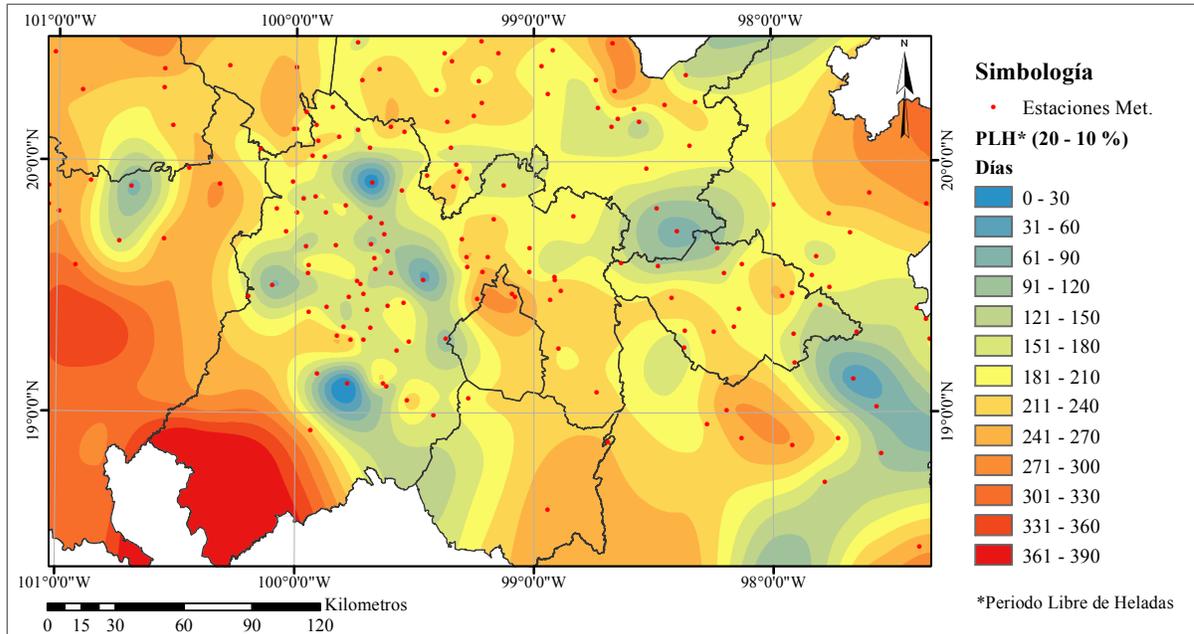
**Figura 5.11:** Periodo Libre de Heladas estimado a un riesgo máximo entre la última y la primera helada de 5-5%. Modelo: Distribución Weibull.



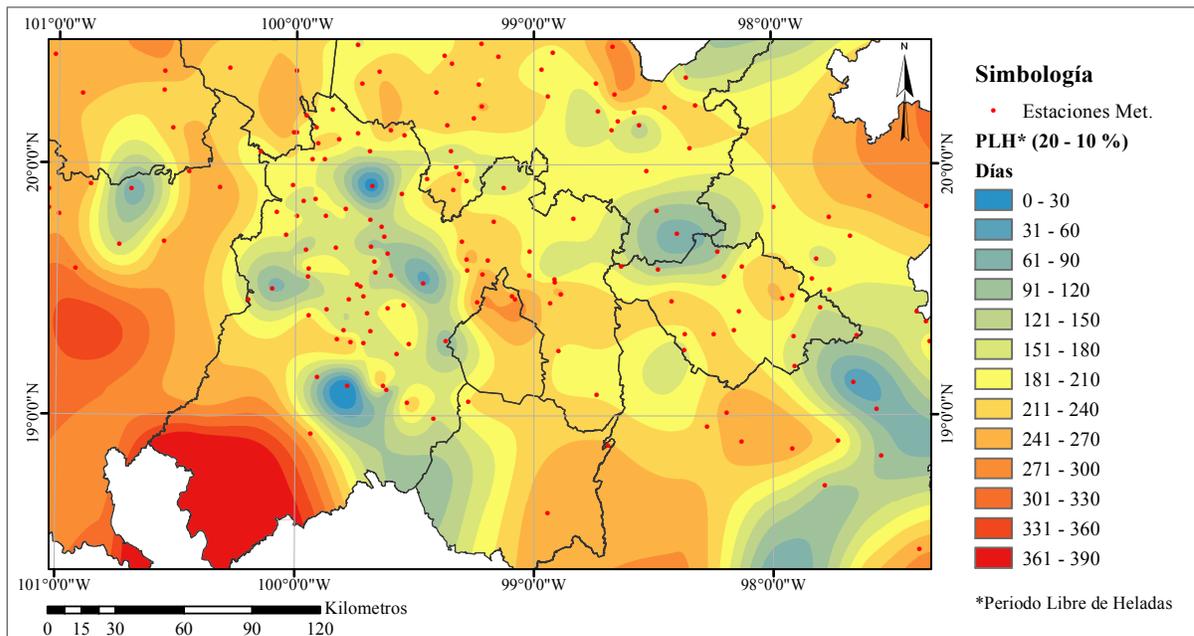
**Figura 5.12:** Periodo Libre de Heladas estimado a un riesgo máximo entre la última y la primera helada de 10-10%. Modelo: Distribución Weibull.

En la Figura 5.13, las áreas que presentan de 151 a 210 días libres de heladas en el Estado de México, coinciden con las áreas con uso potencial para la agricultura mecanizada y de tracción animal continua, clasificadas por el INEGI (2015) (Ver Anexo B.1).

## 5.2. Estimación de la fecha de la última helada (UH), primera helada (PH)



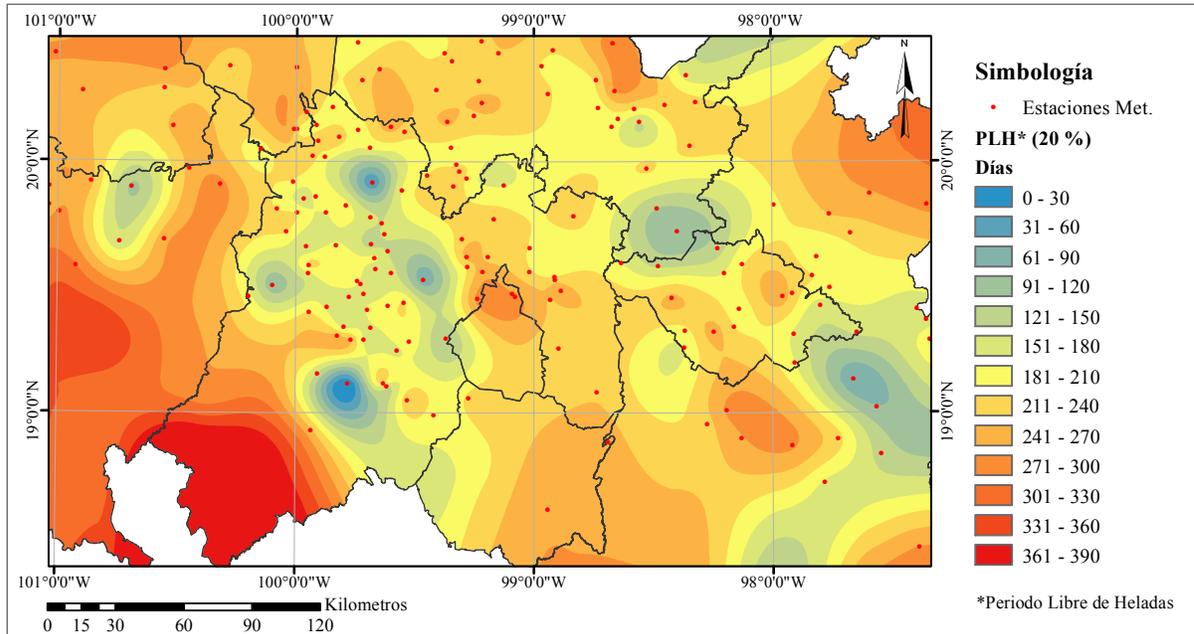
**Figura 5.13:** Periodo Libre de Heladas estimado a un riesgo máximo entre la última y la primera helada de 20-10%. Modelo: **Distribución Weibull.**



**Figura 5.14:** Periodo Libre de Heladas estimado a un riesgo máximo entre la última y la primera helada de 20-10%. Modelo: **Distribución Normal.**

Utilizar los  $PHL_{20-20}$  estimados, puede representar mayor riesgo de presencia de heladas tardías, sin embargo, como se observa en la Figura 5.15, también habilita algunas zonas de alto riesgo para la producción de maíz asumiendo que en dichas zonas se puede presentar

### 5.3. Intensidad de las heladas y periodos de retorno



**Figura 5.15:** Periodo Libre de Heladas estimado a un riesgo máximo entre la última y la primera helada de 20-20%. Modelo: Distribución Weibull.

un evento extremo que afecte las cosechas en uno de cada cinco años, por lo tanto, estas zonas pueden ser aprovechadas para la producción de autoconsumo y no con fines de comercialización, o bien, para establecer otros cultivos de ciclo corto.

### 5.3. Intensidad de las heladas y periodos de retorno

Ademas de conocer las fechas estimadas de ocurrencia de la primera y última helada en un sitio determinado, es importante conocer la intensidad ( $^{\circ}\text{C}$  bajo cero) esperada en cada uno de dichos eventos, de esta manera, se obtiene una caracterización mas detallada del régimen de heladas en fechas extremas.

El Cuadro 5.10, presenta los periodos de retorno de las temperaturas mínimas extremas 0, -1, -2, y -3  $^{\circ}\text{C}$ , correspondientes a la última y primera helada en cada una de las estaciones seleccionadas en el Estado de México. Estos resultados son también presentados para los estados vecinos en los Cuadros 5.8, 5.9, 5.11 y 5.12. En la Sección 5.2.1. se muestra la distribución espacial de las probabilidades de alcanzar temperaturas con los mismos valores de intensidad.

### 5.3. Intensidad de las heladas y periodos de retorno

**Cuadro 5.8:** Periodos de Retorno (Años) de las Temperaturas Mínimas Extremas en los estados de D.F. y Guanajuato

ID	Lugar	Última Helada				Primera Helada			
		0 °C	-1 °C	-2 °C	-3 °C	0 °C	-1 °C	-2 °C	-3 °C
9029	Gran Canal Km. 06+250, D. F	1.32	9.50	24.94	46.51	1.28	6.10	16.31	32.15
9043	San Juan de Aragón, D. F	1.20	5.36	27.47	112.36	1.24	4.83	13.42	28.33
11004	Aldama, Gto.	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
11011	Cinco Señores, Gto.	1.25	7.99	23.98	50.25	1.22	4.68	12.79	26.60
11015	Charcas, Gto.	1.22	3.31	7.55	14.14	1.25	3.02	6.25	10.96
11017	Dolores Hidalgo (SMN), Gto.	1.34	26.67	69.93	125.00	1.26	3.34	7.78	15.11
11022	El Terrero, Gto.	1.26	5.33	15.85	35.21	1.29	6.04	16.18	31.95
11023	Guanajal, Gto.	1.24	8.45	21.46	39.22	1.16	9.62	32.36	71.94
11025	Hacienda de Arriba, Gto.	1.32	8.23	18.62	31.25	1.31	17.89	45.66	81.30
11031	Jerécuaro, Gto.	1.44	82.64	185.19	294.12	1.31	8.14	20.28	36.76
11033	La Begoña, Gto.	1.27	6.59	18.28	36.76	1.32	13.51	32.57	56.18
11035	La Sandia, Gto.	1.36	27.17	67.57	117.65	1.42	33.11	75.19	121.95
11036	Adjuntas, Gto.	1.25	11.93	50.76	136.99	1.19	3.48	8.82	18.05
11042	Los Rodríguez, Gto.	1.25	7.34	21.32	43.86	1.28	7.06	17.86	33.00
11045	Media Luna, Gto.	1.20	3.54	13.04	43.29	1.22	3.18	7.52	14.88
11049	Nuevo Valle Moreno, Gto.	1.36	16.75	39.53	66.67	1.25	3.38	7.66	14.35
11050	Ocampo, Gto.	1.29	10.81	30.58	59.88	1.23	3.50	8.37	16.34
11051	Peñuelitas, Gto.	1.13	3.22	14.66	69.44	1.12	2.61	9.47	37.17
11053	Pozos, Gto.	1.23	4.75	12.17	23.75	1.19	2.37	5.12	10.21
11055	Purísima de Bustos, Gto.	1.24	7.58	25.84	60.98	1.15	2.48	8.40	33.90
11060	Salvatierra, Gto.	1.39	45.87	111.11	188.68	1.93	500.00	1000.00	1666.67
11061	San Antón, Gto.	1.22	4.08	11.74	26.74	1.24	4.02	10.59	22.12
11063	San Cristóbal, Gto.	1.34	11.24	26.11	44.05	1.93	625.00	1250.00	2000.00
11066	San José Iturbide (SMN), Gto.	1.36	37.74	98.04	172.41	1.31	5.82	14.10	25.77
11068	San Luis de La Paz, Gto.	1.13	3.82	28.01	277.78	1.07	1.66	2.94	5.04
11072	Santa Rita, Gto.	1.31	13.09	40.00	81.97	1.47	33.33	71.43	113.64
11077	Tarandacuao, Gto.	1.21	2.64	6.57	15.24	1.17	2.44	6.71	18.90
11079	Valle de Santiago, Gto.	1.42	25.58	59.52	99.01	1.36	8.31	19.12	32.57
11085	Dos Arroyos, Gto.	1.53	128.21	270.27	416.67	1.32	7.95	19.46	34.72
11093	San Miguel de Allende (SMN), Gto.	1.27	7.53	22.27	46.73	1.24	3.30	7.13	12.71
11100	Roque, Gto.	1.36	37.31	98.04	175.44	1.20	3.46	9.55	21.74
11105	Ameche, Gto.	1.29	5.27	11.99	20.96	1.18	2.25	6.40	23.04
11107	La Quemada, Gto.	1.18	2.38	5.91	14.58	1.16	1.87	3.92	9.22
11116	Hacienda San Lucas, Gto.	1.32	10.57	26.81	48.54	1.44	52.36	114.94	181.82
11122	Presa Jalpa, Gto.	1.07	16.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
11131	Las Trojes, Gto.	1.16	2.57	6.61	15.65	1.12	2.19	4.96	10.53
11134	El Conejo, Gto.	1.14	4.48	26.74	147.06	1.21	5.77	15.11	28.99
11135	Arperos, Gto.	1.22	3.45	9.16	20.16	1.26	4.46	13.30	31.15
11140	El Carbón, Gto.	1.30	6.18	14.88	26.81	1.19	4.05	14.22	40.32
11141	Ciénega de Negros, Gto.	1.19	1.99	4.00	8.42	1.09	1.43	2.39	4.83
11142	El Cubo, Gto.	1.41	33.44	75.19	121.95	1.32	10.10	26.39	49.02
11148	El Obraje, Gto.	1.93	909.09	1666.67	2500.00	1.43	50.00	116.28	192.31
11150	San José El Alto, Gto.	1.34	14.73	37.31	66.23	1.27	5.83	14.58	27.25
11151	Tacubaya, Gto.	1.09	2.20	7.93	36.50	1.22	2.17	4.62	10.17
11155	Corral de Piedras, Gto.	1.00	1.26	7.92	25.71	1.00	1.78	5.93	14.20
11157	Peñuelas, Gto.	1.33	4.89	10.22	16.84	1.34	26.74	63.29	106.38
11159	Presa El Barrial, Gto.	1.23	6.46	21.01	48.54	1.22	4.84	17.83	50.76
11160	San Isidro, Gto.	1.23	3.21	7.85	16.18	1.26	6.19	15.11	27.40
11161	El Vergel, Gto.	1.12	3.73	19.27	93.46	1.23	3.79	9.12	17.48
11162	Comanjilla, Gto.	1.20	2.94	10.44	39.68	1.28	4.42	10.83	20.75
11166	El Gigante, Gto.	1.19	4.58	17.54	52.63	1.29	7.03	16.45	28.65

### 5.3. Intensidad de las heladas y periodos de retorno

**Cuadro 5.9:** Periodos de Retorno (Años) de las Temperaturas Mínimas Extremas en el estado de Hidalgo

ID	Lugar	Última Helada				Primera Helada			
		0 °C	-1 °C	-2 °C	-3 °C	0 °C	-1 °C	-2 °C	-3 °C
13012	Huichapan, Hgo.	1.93	169.49	344.83	526.32	1.93	270.27	555.56	833.33
13013	Ixmiquilpan (SMN), Hgo.	1.20	5.22	20.58	60.98	1.26	6.31	15.65	28.74
13018	Mixquiahuala (SMN), Hgo.	1.25	12.79	64.10	200.00	1.31	8.49	21.32	38.76
13027	San Jerónimo, Hgo.	1.21	4.18	11.45	24.45	1.18	2.62	5.66	10.64
13042	Zacualtipán (SMN), Hgo.	1.28	7.82	19.80	36.36	1.17	3.35	10.47	27.93
13060	Actopan, Hgo.	1.17	2.87	8.61	23.98	1.23	3.73	10.09	22.12
13061	Alcholoya, Hgo.	1.13	1.66	3.64	13.02	1.00	2.13	7.30	16.53
13064	Chapantongo, Hgo.	1.34	12.87	31.35	54.64	1.31	6.28	14.79	26.18
13065	Encarnación, Hgo.	1.13	1.61	3.08	7.69	1.21	2.85	6.89	14.58
13068	El Salto, Hgo.	1.20	4.53	16.13	44.64	1.22	4.01	12.25	30.03
13069	El Mezquital Km. 150, Hgo.	1.39	37.45	87.72	144.93	1.23	4.06	11.33	24.94
13070	Santuario, Hgo.	1.24	3.61	8.46	16.10	1.22	5.45	17.39	40.82
13075	Jasso, Hgo.	1.18	5.40	35.84	212.77	1.20	2.89	7.32	16.29
13079	Presa El Girón, Hgo.	1.23	5.49	18.90	47.85	1.17	1.94	4.49	13.05
13080	Presa Endho, Hgo.	1.24	5.33	15.60	33.90	1.29	7.74	19.08	34.36
13081	Presa Golondrinas, Hgo.	1.29	4.70	10.87	19.53	1.27	5.01	12.59	24.10
13082	Presa La Esperanza, Hgo.	1.25	5.92	16.42	33.33	1.17	2.98	7.87	17.83
13083	Presa Madero, Hgo.	1.00	1.92	39.37	3333.33	1.09	1.73	3.64	8.21
13084	Presa Requena, Hgo.	1.26	7.92	22.52	45.25	1.19	3.23	9.76	25.77
13085	Presa Tezoyo, Hgo.	1.30	10.12	26.46	48.78	1.28	5.69	14.14	26.39
13089	Tepeji del Río, Hgo.	1.04	2.92	28.65	666.67	1.10	2.20	5.42	12.58
13090	Río Salado, Hgo.	1.21	3.89	11.27	26.04	1.28	5.74	13.61	24.33
13092	Tula (DGE), Hgo.	1.31	4.52	9.28	15.13	1.23	2.71	5.93	11.44
13093	Venados, Hgo.	1.30	5.41	13.23	24.57	1.37	10.02	22.88	38.61
13095	Agua Blanca, Hgo.	1.19	2.81	10.22	42.74	1.25	4.27	10.38	19.76
13096	Atotonilco, Hgo.	1.25	6.14	17.04	34.48	1.28	3.69	8.05	14.25
13097	Chilcuautla, Hgo.	1.29	9.26	26.32	52.36	1.20	2.96	10.42	38.46
13098	Huasca, Hgo.	1.28	6.61	16.10	29.07	1.19	3.41	11.29	32.47
13099	Metepc, Hgo.	1.21	3.02	6.73	12.59	1.24	3.80	8.69	15.92
13100	Omitlán, Hgo.	1.13	1.86	5.15	24.27	1.21	3.13	7.15	13.64
13105	Cardonal, Hgo.	1.32	7.13	17.39	31.35	1.31	6.65	15.60	27.32
13109	E.T.A. 385 Santiago de Anaya, Hgo.	1.28	9.62	28.74	59.17	1.43	34.13	75.19	119.05
13112	Mineral del Chico, Hgo.	1.21	3.33	8.88	19.84	1.31	6.37	14.84	25.91
13115	Real del Monte, Hgo.	1.30	5.41	13.23	24.57	1.23	2.76	5.72	10.26
13116	El Zembo, Hgo.	1.31	8.67	20.53	35.71	1.23	3.76	8.53	15.46
13121	Santa María Amajac, Hgo.	1.39	60.61	144.93	243.90	1.28	5.30	12.41	22.12
13125	Alfajayucan (DGE), Hgo.	1.28	8.27	24.57	51.02	1.34	7.56	17.70	30.77
13148	Xitha, Hgo.	1.05	0.00	21.00	0.00	1.00	0.00	20.00	0.00
13149	El Banco, Hgo.	1.39	20.08	44.84	72.99	1.29	13.12	36.50	69.44
13151	El Encino, Hgo.	1.32	12.09	32.57	60.98	1.21	4.25	12.69	29.50
13152	El Potrero, Hgo.	1.31	21.74	69.44	142.86	1.27	5.93	15.65	30.49

### 5.3. Intensidad de las heladas y periodos de retorno

**Cuadro 5.10:** Periodos de Retorno (Años) de las Temperaturas Mínimas Extremas en el estado de México

ID	Lugar	Última Helada				Primera Helada			
		0 °C	-1 °C	-2 °C	-3 °C	0 °C	-1 °C	-2 °C	-3 °C
15002	Aculco (SMN), Mex.	1.20	3.59	11.75	32.89	1.13	1.83	4.09	10.70
15008	Atenco, Mex.	1.23	6.36	20.88	48.78	1.23	3.10	6.03	9.78
15010	Atotonilco, Mex.	1.34	42.02	104.17	181.82	1.14	1.98	4.30	9.78
15014	Capulhuac, Mex.	1.07	1.78	3.44	6.34	1.10	1.57	2.63	4.63
15020	Chalco -San Lucas-, Mex.	1.20	3.53	10.63	26.67	1.10	2.24	10.43	107.53
15022	Chiconautla, Mex.	1.06	2.11	6.49	20.79	1.10	1.84	4.34	11.78
15024	Presa Danxho, Mex.	1.22	4.42	12.18	25.91	1.23	2.62	5.30	9.43
15025	Ejido de Llano Grande, Mex.	1.20	3.93	8.96	16.10	1.18	3.22	7.69	14.99
15028	El Tajo -Tunel Viejo-, Mex.	1.32	9.35	22.57	39.68	1.30	7.54	19.08	35.21
15029	El Tejocote, Mex.	1.17	8.10	33.56	91.74	1.16	2.58	6.08	12.72
15037	Jiquipilco, Mex.	1.54	138.89	294.12	454.55	1.37	11.34	25.19	41.32
15038	Joquicingo, Mex.	1.02	1.58	3.93	10.99	1.05	1.69	3.86	9.50
15041	Gran Canal Km 27+250, Mex.	1.18	3.72	10.76	24.94	1.18	2.66	6.67	15.15
15045	La Marquesa, Mex.	1.08	5.36	18.45	44.25	1.06	2.34	5.69	11.82
15047	Las Arboledas, Mex.	1.23	3.90	10.54	22.78	1.07	1.96	9.56	212.77
15051	Los Velázquez, Mex.	1.22	4.76	13.61	29.41	1.12	1.63	3.00	6.20
15055	Maquixco, Mex.	1.45	33.67	72.46	114.94	1.35	9.82	22.37	37.59
15058	Molinito, Mex.	1.24	5.64	19.80	51.28	1.28	6.90	18.94	37.59
15062	Nevado de Toluca, Mex.	1.23	3.74	9.53	19.53	1.29	10.18	26.81	49.75
15063	Nueva Santa Elena, Mex.	1.25	7.23	23.26	52.63	1.18	4.49	17.15	51.28
15064	Oxthoc, Mex.	1.24	7.90	28.74	71.43	1.15	2.37	5.50	11.85
15066	Palizada, Mex.	1.38	16.08	36.90	60.98	1.38	14.77	33.00	54.05
15069	Polotitlán, Mex.	1.42	80.00	185.19	303.03	1.49	18.80	38.46	59.17
15071	Presa El Tigre, Mex.	1.25	8.01	26.46	60.24	1.19	2.10	4.06	7.55
15073	Presa Guadalupe, Mex.	1.08	3.05	12.77	48.78	1.02	2.16	9.60	48.08
15074	Presa La Concepción, Mex.	1.28	13.09	40.98	85.47	1.32	6.94	16.67	29.67
15075	Presa Las Ruinas, Mex.	1.46	82.64	178.57	285.71	1.93	1111.11	2500.00	3333.33
15076	Presa Tepetitlán, Mex.	1.21	3.26	9.05	21.51	1.17	2.54	6.21	13.81
15078	Presa Francisco Trinidad Fabel, Mex.	1.30	7.01	17.24	31.15	1.28	6.84	18.62	36.76
15083	San Andrés, Mex.	1.29	7.85	18.48	32.05	1.11	2.45	6.22	14.01
15085	San Bartolo del Llano, Mex.	1.20	4.42	13.33	30.86	1.22	3.59	8.77	17.30
15086	San Bernabé, Mex.	1.38	16.37	36.90	60.61	1.40	24.94	55.25	89.29
15088	San Francisco Oxtotilpan, Mex.	1.00	0.00	0.00	0.00	1.23	13.50	0.00	0.00
15089	San Francisco Talcalcalpan, Mex.	1.26	8.61	25.38	52.08	1.24	5.64	16.50	35.46
15093	San Lorenzo Malacota, Mex.	1.41	49.50	112.36	181.82	1.27	26.39	77.52	149.25
15098	San Martin Obispo, Mex.	1.22	6.17	24.81	71.94	1.22	4.01	10.98	23.75
15103	San Pedro Nexapa, Mex.	1.46	25.51	54.05	84.75	1.25	5.43	14.86	30.21
15104	San Pedro Potla, Mex.	1.37	45.66	114.94	200.00	1.38	19.80	45.25	74.63
15108	Santa María del Monte, Mex.	1.30	11.55	32.26	62.50	1.93	200.00	400.00	625.00
15115	Santo Tomas Puente Colgante, Mex.	1.27	10.35	30.67	62.11	1.12	2.06	4.85	11.70
15117	Temascalcingo, Mex.	1.23	6.45	29.33	96.15	1.12	1.70	2.83	4.58
15122	Tenango, Mex.	1.25	2.07	3.54	5.78	1.26	2.39	4.48	7.67
15126	Toluca (Obs.), Mex.	1.11	2.97	9.13	23.92	1.10	2.97	22.88	434.78
15128	Tultenango, Mex.	1.00	1.42	6.08	37.45	1.00	1.59	4.93	15.02
15145	Plan Lago de Texcoco, Mex.	1.19	4.30	15.38	43.67	1.17	2.13	4.57	9.68
15158	San Pedro de Los Baños, Mex.	1.15	2.56	9.02	37.04	1.13	2.45	5.01	8.85
15160	Santiago del Monte, Mex.	1.34	29.24	76.92	138.89	1.26	9.22	29.59	64.94
15170	Chapingo (DGE), Mex.	1.23	9.31	39.84	112.36	1.16	2.58	6.96	17.70
15185	Presa El Molino, Mex.	1.27	4.81	11.40	20.88	1.21	5.07	16.00	37.59
15187	Presa Huapango, Mex.	1.28	8.68	22.73	42.37	1.23	2.86	6.40	12.42
15189	La Concepción, Mex.	1.21	10.41	45.45	126.58	1.26	3.77	8.50	15.43
15190	Presa San Ildefonso, Mex.	1.16	2.22	5.68	15.48	1.17	2.64	5.77	10.94
15197	Cuesta del Carmen, Mex.	1.25	2.47	4.43	7.09	1.09	1.20	1.42	1.92

### 5.3. Intensidad de las heladas y periodos de retorno

ID	Lugar	Última Helada				Primera Helada			
		0 °C	-1 °C	-2 °C	-3 °C	0 °C	-1 °C	-2 °C	-3 °C
15199	Mina Vieja, Mex.	1.18	13.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
15201	Trojes, Mex.	1.28	14.84	44.44	89.29	1.17	3.13	8.28	18.35
15203	Calixtlahuaca, Mex.	1.22	6.59	20.16	43.86	1.09	1.94	3.87	7.21
15217	San Juan Acazuchitlán, Mex.	1.27	6.34	15.11	26.88	1.29	4.70	10.34	17.76
15231	Presa Iturbide, Mex.	1.14	3.18	7.09	12.80	1.17	2.48	5.22	9.65
15233	San Nicolás Mavati, Mex.	1.20	0.00	12.00	0.00	1.00	0.00	11.00	0.00
15238	Santa Maria del Llano, Mex.	1.16	2.62	7.47	20.49	1.14	1.73	3.07	5.63
15239	San Antonio Trojes, Mex.	1.23	8.60	34.13	90.91	1.31	6.86	15.90	27.55
15240	San Francisco Putla, Mex.	1.40	27.70	62.89	103.09	1.37	27.55	66.23	112.36
15244	Muyteje, Mex.	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
15245	La Jordana, Mex.	1.48	51.55	109.89	172.41	1.38	18.94	43.67	72.46
15251	Atlacomulco Ii (DGE), Mex.	1.17	5.18	26.46	106.38	1.09	1.82	4.17	10.43
15256	Ocuilan E-23, Mex.	1.08	2.46	76.34	Inf	1.21	8.26	95.24	1000.00
15260	San Lucas Totolmaloya, Mex.	1.27	5.00	12.94	25.51	1.40	12.71	27.40	43.86
15261	El Jazmín, Mex.	1.52	1428.57	3333.33	5000.00	1.47	74.07	158.73	250.00
15264	Buenos Aires, Mex.	1.34	10.88	25.91	44.64	1.43	22.57	48.54	76.92
15266	Codagem, Mex.	1.14	2.28	7.69	34.97	1.15	2.36	5.70	13.05
15267	Chichilpa, Mex.	1.52	63.29	131.58	204.08	1.46	23.75	51.02	80.65
15282	Tres Barrancas, Mex.	1.23	7.44	26.25	64.10	1.17	2.98	8.31	20.20
15301	Texcaltitlan D-7, Mex.	1.27	15.63	52.63	114.94	1.40	78.12	181.82	294.12
15315	Caseta EPCCA, Mex.	1.28	9.40	24.45	45.05	1.21	3.12	6.91	12.76
15317	San José Epifanía, Mex.	1.41	19.88	42.55	67.57	1.51	104.17	222.22	344.83
15333	El Palmito, Mex.	1.39	15.24	33.00	52.91	1.48	33.00	69.44	108.70
15341	San Antonio Nixini, Mex.	1.29	3.58	7.36	12.44	1.32	3.62	7.07	11.42

**Cuadro 5.11:** Periodos de Retorno (Años) de las Temperaturas Mínimas Extremas en el estado de Michoacán y Morelos

ID	Lugar	Última Helada				Primera Helada			
		0 °C	-1 °C	-2 °C	-3 °C	0 °C	-1 °C	-2 °C	-3 °C
16014	Camécuaro, Mich.	1.25	3.93	10.04	20.49	1.59	192.31	400.00	625.00
16016	Carrillo Puerto, Mich.	1.69	588.24	1250.00	2000.00	1.46	121.95	263.16	416.67
16017	Casa Blanca, Mich.	1.34	12.58	31.85	56.82	1.32	7.66	18.98	34.36
16020	Ciudad Hidalgo (DGE), Mich.	1.42	75.76	172.41	285.71	1.39	23.81	56.18	94.34
16052	Huingo, Mich.	1.25	10.11	35.84	84.03	1.22	5.74	17.95	40.82
16087	Patzcuaro, Mich.	1.32	14.27	35.09	61.35	1.17	3.89	19.53	97.09
16091	Alvaro Obregon (DGE), Mich.	1.38	16.21	36.63	60.24	1.41	34.13	78.12	128.21
16105	Quirio, Mich.	1.21	10.19	48.31	147.06	1.23	3.71	8.08	14.14
16111	San José, Mich.	1.37	26.95	65.36	111.11	1.31	4.16	8.55	14.12
16118	Santa Fe, Mich.	1.44	52.08	114.94	185.19	1.58	87.72	181.82	277.78
16120	Santiago Undameo, Mich.	1.23	5.24	16.29	37.59	1.32	20.04	52.36	94.34
16124	Temascales, Mich.	1.29	11.78	31.65	59.17	1.21	2.31	4.81	9.45
16137	Urepetiro, Mich.	1.32	8.33	19.61	33.90	1.93	454.55	909.09	1428.57
16225	Villa Jiménez II, Mich.	1.21	5.25	20.08	57.47	1.20	3.20	11.49	40.32
16235	Huajúmbaro, Mich.	1.25	6.51	19.05	40.00	1.20	4.22	14.12	37.45
16255	Ucareo, Mich.	1.44	23.15	50.76	81.30	1.93	227.27	454.55	666.67
17021	Tlacualera, Mor.	1.93	285.71	555.56	833.33	1.93	454.55	909.09	1428.57
17046	Hueyapan E-4, Mor.	1.33	7.47	16.95	28.82	1.24	3.14	7.91	17.21
17047	Huitzilac, Mor.	1.31	11.19	29.94	56.18	1.11	2.82	Inf	Inf

### 5.3. Intensidad de las heladas y periodos de retorno

**Cuadro 5.12:** Periodos de Retorno (Años) de las Temperaturas Mínimas Extremas en el estado de Puebla, Querétaro y Tlaxcala

ID	Lugar	Última Helada				Primera Helada			
		0 °C	-1 °C	-2 °C	-3 °C	0 °C	-1 °C	-2 °C	-3 °C
21007	Ahuatepec, Pue.	1.35	5.14	10.75	17.67	1.27	3.44	7.59	13.83
21016	Balcón del Diablo, Pue.	1.23	5.34	17.64	43.29	1.12	1.68	3.71	12.30
21021	Capuluaque (CFE), Pue.	1.33	7.58	17.48	30.03	1.34	7.89	17.51	29.15
21034	Echeverría, Pue.	1.29	10.02	26.18	48.31	1.15	1.81	3.53	7.47
21035	Puebla (DGE), Pue.	1.37	17.79	43.29	74.63	1.29	8.67	25.06	50.76
21040	Guadalupe Buenavista, Pue.	1.29	5.62	13.99	26.25	1.33	9.56	23.31	41.15
21047	Ixtacamaxtitlan (CFE), Pue.	1.23	4.42	12.32	26.53	1.12	1.84	4.12	10.50
21052	Alchichica, Pue.	1.31	11.44	30.03	55.56	1.24	3.14	6.54	11.40
21060	Palmar de Bravo, Pue.	1.36	9.45	21.19	35.21	1.33	5.45	11.98	20.33
21069	Sn. Antonio Arroyo Prieto, Pue.	1.20	6.54	31.06	105.26	1.19	3.42	9.43	21.46
21080	San Salvador El Seco, Pue.	1.17	2.87	7.52	17.21	1.18	3.35	9.55	22.73
21081	Santa Cruz Coyotepec, Pue.	1.01	1.20	2.00	4.52	1.05	1.98	5.84	18.05
21082	Tecamachalco, Pue.	1.20	6.26	27.10	84.03	1.34	9.53	21.51	35.97
21083	Tehuacán, Pue.	1.23	2.36	4.78	8.98	1.10	1.85	4.02	8.99
21091	Teziutlan, Pue.	1.38	13.55	31.65	53.48	1.30	4.31	8.95	14.86
21102	Xochitlan Todos Santos, Pue.	1.93	357.14	714.29	1111.11	1.44	57.80	133.33	217.39
21103	Zacapoaxtla (SMN), Pue.	1.38	20.75	49.50	84.03	1.35	10.32	26.18	47.39
21111	Santiago Zautla (CFE), Pue.	1.27	4.78	12.33	24.33	1.32	10.52	25.84	45.66
21117	Guadalupe Victoria, Pue.	1.17	3.80	14.64	47.85	1.19	2.44	5.16	9.83
21119	Libres (SMN), Pue.	1.33	6.75	14.75	24.45	1.39	22.78	51.28	83.33
21126	Loma Alta (CFE), Pue.	1.20	2.70	6.18	12.55	1.17	2.21	4.52	8.66
22004	El Batán, Qro.	1.29	15.55	49.50	103.09	1.34	26.74	75.19	142.86
22005	El Doctor, Qro.	1.37	13.28	29.33	47.62	1.24	3.19	7.28	13.95
22022	San Juan del Río (DGE), Qro.	1.25	8.14	25.13	53.76	1.32	5.31	11.76	20.12
22024	Tres Lagunas, Qro.	1.39	45.25	111.11	188.68	1.34	7.52	17.67	30.77
22025	Presa Centenario, Qro.	1.33	19.61	50.25	89.29	1.30	4.97	12.12	22.78
22029	Huimilpan, Qro.	1.23	6.47	23.58	60.98	1.20	2.12	4.00	7.18
22031	Presa Paso de Tablas, Qro.	1.26	6.53	20.00	44.05	1.19	3.14	11.66	43.48
22033	San Pablo, Qro.	1.31	12.42	33.78	63.69	1.26	4.23	9.97	18.52
22035	Bizarrón, Qro.	1.30	11.01	30.86	59.88	1.36	3.90	7.48	11.79
22047	Presa El Capulín, Qro.	1.30	20.24	67.11	142.86	1.40	13.83	30.49	49.50
29002	Apizaco, Tlax.	1.11	2.75	10.71	43.29	1.07	1.65	3.32	7.24
29003	Atlanga San José, Tlax.	1.29	7.86	20.45	38.46	1.18	2.33	5.06	10.21
29007	El Carmen, Tlax.	1.14	1.53	2.25	3.41	1.11	1.31	1.68	2.32
29011	Huamantla, Tlax.	1.22	3.34	7.93	15.53	1.21	2.83	6.34	12.20
29025	San Marcos Huaquilpan, Tlax.	1.32	13.87	35.09	62.50	1.25	4.16	9.60	17.42
29026	Zitlaltepec, Tlax.	1.23	3.98	10.65	22.57	1.16	1.83	3.49	7.06
29030	Tlaxcala de Xicotécatl (DGE), Tlax.	1.20	13.68	52.36	126.58	1.22	5.96	16.34	32.68
29032	Tlaxco, Tlax.	1.10	2.23	5.32	11.64	1.13	2.00	4.10	8.10
29034	Zoquiapan, Tlax.	1.38	50.25	123.46	212.77	1.36	37.74	98.04	172.41
29040	Ixtacuixtla, Tlax.	1.30	8.89	22.17	40.00	1.22	3.26	7.93	16.08
29041	Tepetitla, Tlax.	1.47	73.53	158.73	250.00	1.41	22.99	50.51	81.30
29042	Amaxac de Guerrero, Tlax.	1.10	2.29	7.57	28.33	1.12	2.37	8.13	32.47
29047	Españita, Tlax.	1.23	3.81	9.49	18.87	1.32	7.47	17.61	30.77
29051	Toluca de Guadalupe, Tlax.	1.18	2.10	3.91	6.79	1.16	3.00	7.25	14.62
29052	El Rosario, Tlax.	1.21	2.96	7.16	14.93	1.13	2.36	5.66	12.36
29053	Terrenate, Tlax.	1.23	3.82	10.26	22.12	1.29	5.10	12.17	22.22
29151	Altzayanca, Tlax.	1.18	3.76	15.67	58.82	1.20	2.83	7.30	16.89

### 5.3. Intensidad de las heladas y periodos de retorno

#### 5.3.1. Mapas de intensidad

El mapa de probabilidades de la intensidad de la última helada (Figura 5.16) en el Estado de México, indica que la temperatura mínima extrema que se presenta con mayor frecuencia en la última helada es de 0 °C, ya que más del 90 % de las estaciones analizadas presentan esta intensidad con probabilidades muy cercanas a uno. También se observa que la probabilidad de que una helada tardía presente una intensidad de hasta -1°C es menor al 50% en casi todo el estado, excepto en las áreas de influencia del Nevado de Toluca, donde el PHL es casi nulo y se pueden esperar incluso heladas de mayor magnitud. De acuerdo con el mapa, las áreas que presentan intensidades inferiores a 0°C, se localizan en Capulhuac, Chiconautla y en las áreas representadas por las estaciones de las presas: Iturbide, Tepetitlán, Danxho y Guadalupe, donde se observa que con probabilidades de entre 0.3 y 0.5 la última helada presenta una intensidad de hasta -1°C, mientras que las probabilidades de alcanzar en dicha zona los -2°C oscilan entre 0.1 y 0.3. Como eventos extremos en el estado de México, se reportan intensidades de hasta -3°C en las estaciones de Atenango, Capulhuac, Cuesta del Carmen, y Joquicingo, cuyos periodos de retorno van de 6 a 10 años (Cuadro 5.10).

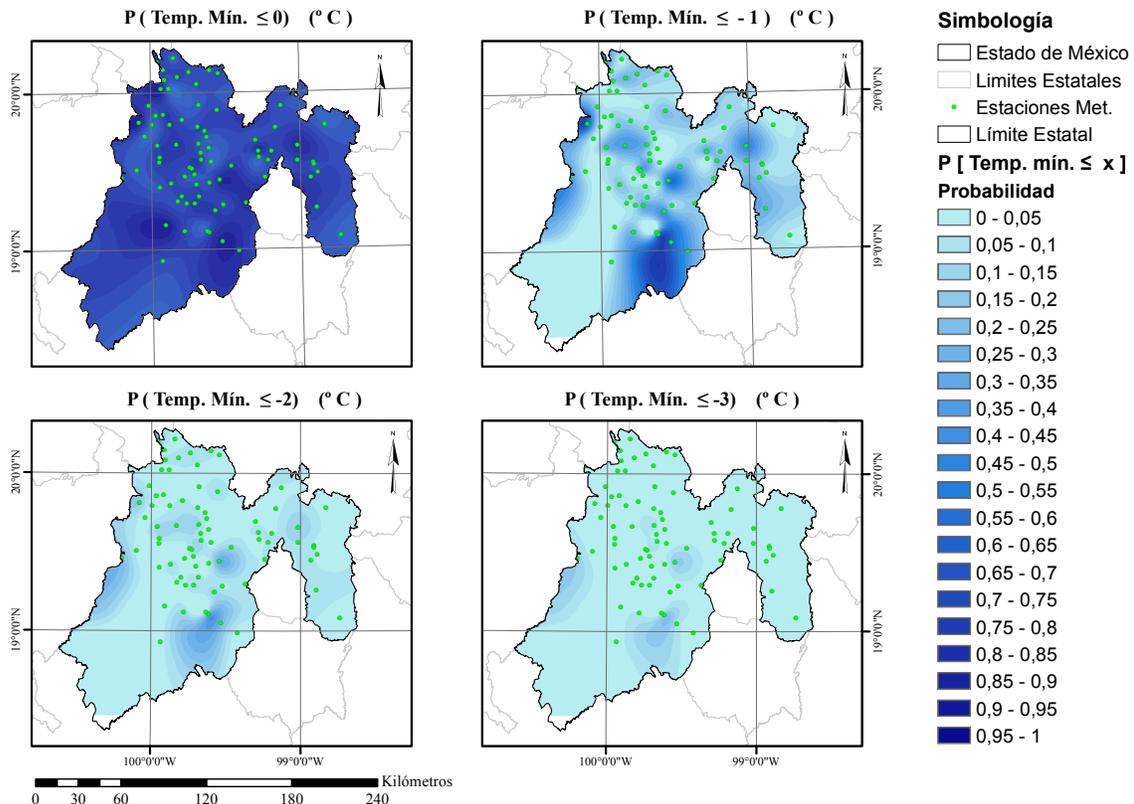


Figura 5.16: Intensidad de la temperatura de Última Helada.

### 5.3. Intensidad de las heladas y periodos de retorno

De manera similar, la intensidad predominante de la temperatura mínima correspondiente a las primeras heladas en el área de estudio es de  $0^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, la Figura 5.17, muestra que en el Estado de México 46 estaciones (60 % del estado) pueden llegar a registrar hasta  $-1^{\circ}\text{C}$  en la primera helada con una probabilidad de 50 a 20 %, lo que es equivalente a periodos de retorno entre 2 y 5 años. Considerando el mismo intervalo de probabilidad, para una intensidad de  $-2^{\circ}\text{C}$  se identificaron 23 estaciones (30 %), entre las que resaltan Cuesta del Carmen, Clapuhuac, Temascalcingo y Los Velazquez, estaciones que incluso presentan entre un 10 y 20 % de probabilidad de primeras heladas con una intensidad de hasta  $-3^{\circ}\text{C}$ .

Analizando visualmente los mapas de la intensidad de la primera y ultima helada, se puede observar que en el Estado de México, las heladas más peligrosas son las primeras, ya que con probabilidad de entre el 15 y el 25 % la temperatura mínima puede alcanzar hasta  $-3^{\circ}\text{C}$  en la mayoría de las estaciones. En general, se observa el mismo comportamiento al considerar las intensidades de 0, -1, y  $-2^{\circ}\text{C}$ , las primeras heladas siempre presentan mayor probabilidad respecto a las primeras heladas.

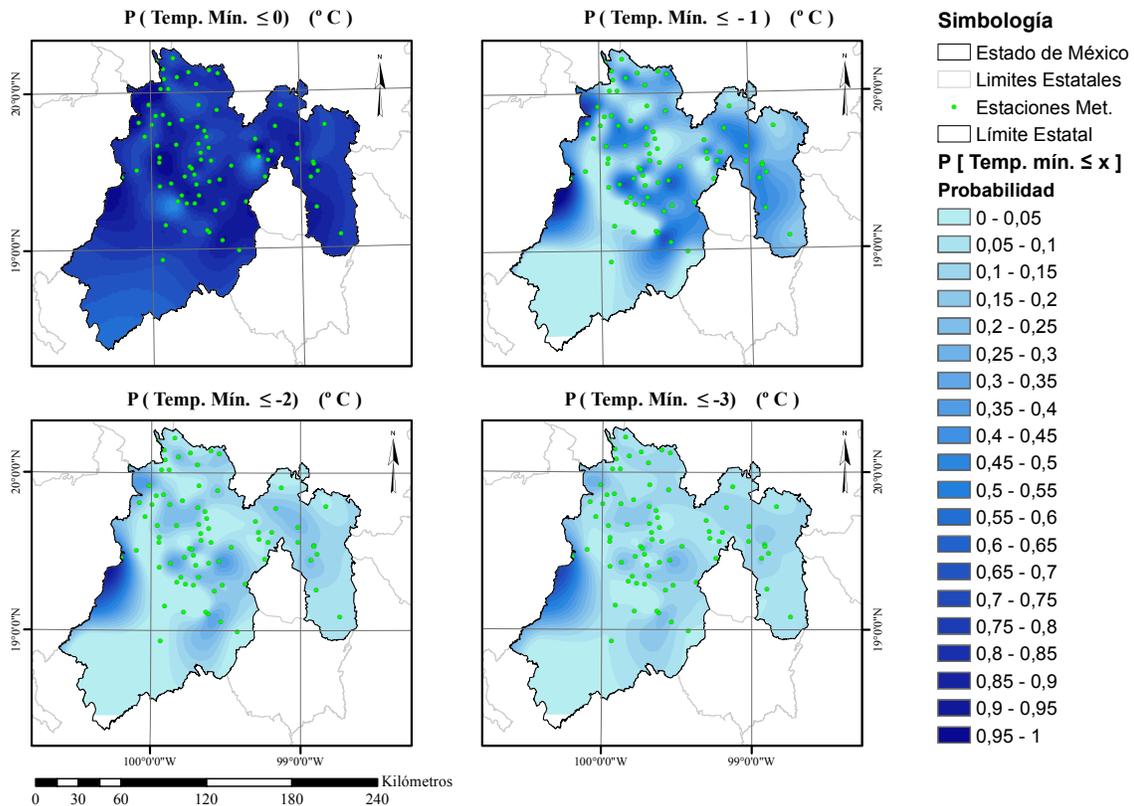


Figura 5.17: Intensidad de la temperatura de Primera Helada

# Capítulo 6

## Conclusiones y Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se pueden resumir las siguientes conclusiones:

- Desde la perspectiva de la TVE, se estimaron las fechas de ocurrencia de la primera y última helada en la Región Centro de México, considerando tres niveles de riesgo: 5, 10 y 20 %, usando como modelo la distribución Weibull. Esta información facilita la toma de decisiones en la planeación y prevención de riesgos.
- Se estimó el Periodo Libre de Heladas con riesgos máximos del 20 % para la última helada y el 10 % para la primera helada. La probable estación de crecimiento del cultivo de maíz, se constituye por las áreas donde se detectaron  $PLH > 150$  días, las cuales coinciden con las áreas con clasificadas por el [INEGI \(2015\)](#) como de uso potencial para la agricultura mecanizada.
- En el Estado de México, las áreas que presentan un Periodo Libre de Heladas (con riesgo máximo de 20-10 %) entre 151 y 210 días, coinciden con las áreas con clasificadas por el [INEGI \(2015\)](#) como de uso potencial para la agricultura mecanizada continua.
- La intensidad más frecuente en la primera y última helada fue de  $0^{\circ}\text{C}$ . Las primeras heladas son menos frecuentes que las últimas, pero son las más peligrosas por presentar mayor probabilidad de intensidades altas.
- Los mapas de riesgo de ocurrencia, PLH e intensidad, permitieron caracterizar la distribución espacial de los regímenes de heladas y extrapolar información a lugares que no cuentan con datos.

## 6. Conclusiones y Recomendaciones

---

- La distribución Weibull presentó un ajuste satisfactorio a los datos de la última y primera helada, de acuerdo con el AIC, y permitió caracterizar satisfactoriamente el régimen de ocurrencia de las heladas en el Estado de México.
- En estudios similares, se recomienda usar estaciones auxiliares con datos de al menos 15 años, para tener mayor representatividad geográfica.
- Se recomienda usar la distribución Weibull como alternativa confiable para estimar probabilidades e inferencia de fechas de ocurrencia de heladas.
- Se recomienda emplear esta metodología para evaluar los riesgos de heladas e determinadas fechas, para tomar decisiones oportunas y puntuales en la implementación de políticas públicas orientadas al sector agrícola.

# Bibliografía

- Arteaga, R. R. (1988). *Aptitud Agroclimática del Área de Chapingo con respecto al maíz (Zea Maiz L.)*. Tesis de maestría., Colegio de Postgraduados.
- Bravo, T. J. M. (1992). *Modelos matemáticos para pronóstico de temperaturas ambientales*. Tesis de licenciatura, Universidad de Sonora, Depto. de Matemáticas.
- Breña, P. A. F. y Breña, N. J. A. (2005). *Frecuencia de Valores Extremos en Hidrología*. Universidad de Colima, Colima, México.
- Burgos, J. J. (1947). A cryokindynoscopic index useful in agroclimatic researches. *Climatological Commision Doc. 17 y Agr. Met. Commision Doc. 30. I.M.O. Toronto*.
- Burgos, J. J. y Hirschhorn, J. (1963). *Las heladas en la Argentina*, tomo 3. Secretaría de Estado de Agricultura y Ganadería de la Nación, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Burnham, K. P. y Anderson, D. (2002). *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-theoretic Approach*. Springer, segunda edición.
- Canavos, C. G. (1988). *Probabilidad y estadística, aplicaciones y métodos*.
- Castillo, E., Hadi, A., Balakrishnan, N. y Sarábia, J. (2005). *Extreme value and related models with applications in engineering and science*. John Wiley & Sons.
- Castillo, F. E. y Sentís, F. C. (2001). *Agrometeorología*. Mundi-Prensa, segunda edición. ISBN 9788471149732.
- Castillo, R. E. (1988). Estadística de valores extremos. Distribuciones asintóticas. *Estadística Española*, , 116, 5 – 34.
- CLICOM (2015). Datos climáticos diarios del clicom del smn con gráficas del cicese. <http://clicom-mex.cicese.mx>. Consulta: marzo del 2015.
- Coles, S. G. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer. London.
- Da Fina, A. L. y Ravelo, A. C. (1975). *Climatología y fenología agrícolas*. Editorial Universitaria de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Day, P. C. (1911). *Frost data of the United State and lenght of the crop-growing season*. (Weather Bur. Bul. V), Washington.
- de Haan, L. y Ferreira, A. (2006). *Extreme value theory, an introduction*. Springer.

## Bibliografía

---

- Delignette-Muller, M., Pouillot, R., Denis, J. y Dutang, C. (2010). *fitdistrplus: help to fit of a parametric distribution to non-censored or censored data. r package version 0.1-3.*
- Díaz, D. P., Cruz, S. J. B., López, M. T. y Sesma, J. A. A. P. (2009). Periodo libre de heladas para el Estado de Aguascalientes y su relación con El Niño. *Investigación y Ciencia*, 17, 45, 12–23.
- Díaz, P. G., Sánchez, C. I., Quiroz, R., Garatuza, P. J., Watts, T. C. y Cruz, M. I. R. (2008). Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México. *Agricultura técnica en México*, 34, 3, 279–287.
- ESRI (2010). *ArcMap 10.0*. Environmental Systems Research Institute, Redlands, California, USA.
- Fernández, L. M. E., Murphy, G. y K., T. M. (2007). Índice de riesgo sistémico de heladas (IRIS). *Agronomía Tropical*, 58, 1, 65–68.
- Fisher, R. A. y Tippett, L. H. C. (1928). Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. En *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, tomo 24, 180–190. Cambridge Univ Press.
- Fries, A., Rollenbeck, R., Nauß, T., Peters, T. y Bendix, J. (2012). Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization. *Agricultural and forest meteorology*, 152, 17–30.
- García, C. O. R. y Valdéz, M. A. (1986). Cálculo de probabilidad de heladas en el valle de mexicali, b. c. Inf. téc., Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería, Mexicali, B. C. México.
- Gnedenko, B. (1943). Sur la distribution limite du terme maximum d'une serie aleatoire. *Annals of mathematics*, 423–453.
- Grassi, C. B. A., Muñoz, O. A., Castillo, M. E. y Camarillo, C. (1986). Riesgo de primeras y últimas heladas en Puebla y Tlaxcala respecto a los cultivos básicos. *Revista Agrociencia. Chapingo, México.*, , 65, 125–139.
- Guttorp, P. (2014). Statistics and Climate. *Annual Review of Statistics and Its Application*, 1, 87–101.
- Guttorp, P., Sain, S. R. y Wikle, C. K. (2012). Advances in statistical methods for climate analysis. *Environmetrics*, 23, 5, 363–363.
- Hosking, J. R. M. y Wallis, J. R. (2005). *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*. Cambridge University Press.
- INEGI (2015). Instituto nacional de estadística y geografía. <http://www.inegi.org.mx>.
- INEGI (2016). Instituto nacional de estadística y geografía. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/estadistica/>.
- Jenkinson, A. F. (1955). The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 81, 348, 158–171.

## Bibliografía

---

- Kotz, S. y Nadarajah, S. (2000). *Extreme value distributions: theory and applications*. Imperial College Press. London.
- Lindkvist, L. y Chen, D. (1999). Air and soil frost indices in relation to plant mortality in elevated clear-felled terrain in Central Sweden. *Climate Research*, 12, 65–75.
- Massey Jr, F. J. (1951). The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American statistical Association*, 46, 253, 68–78.
- Matías, R. L. G., Fuentes, M. O. A. y García, J. F. (2001). Heladas. Serie Fascículos. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Coyacan, México D. F.
- Montesinos, S. G., Tijerina, C. L., Ortíz, S. C. A., Zárate de Lara, G. P. y Haro, A. G. (1988). *Pronóstico de heladas tempranas en Chapingo México, por medio del análisis discriminante*. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Agrometeorología.
- Mora, G. V. (2015). *Determinación de la probabilidad y ocurrencia de heladas en los estados de Tlaxcala y Puebla*. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados.
- Ortíz, S. C. A. (1987). *Elementos de agrometeorología cuantitativa: con aplicaciones en la República Mexicana*. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.
- Ortíz, S. C. A. y Pajaro (1992). Estimación del periodo libre de heladas para la República Mexicana. *Revista de Geografía Agrícola*, , 17, 109–118.
- Pájaro, H. D. y Ortíz, S. C. A. (1992). Estimación del periodo de crecimiento por disponibilidad de agua y libre de heladas para la República Mexicana. *Revista de Geografía Agrícola*, , 17, 119–125.
- Pascale, D. y Damario, E. (2004). *Bioclimatología Agrícola y Agroclimatología*. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- R Development Core Team (2004). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0.
- Rahn, J. J. (1979.). *Making the Weather Work for You. A practical guide for gardener and farmer*. Garden Way Publishing, Charlotte, Vermont.
- Reed, W. G. (1911). Frost in the united states. En *Pam American Scientific Congress*, tomo 2, 38.
- Reed, W. G. (1916). TheProbableGrowingSeason. *MonthlyWeather Review*, 44, 9, 509–612.
- Ríos-Alejandro, J. G. (2011). Temperaturas extremas en la ciudad de Monterrey NL México. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 17, 2, 225–230.
- Romo, G. J. R. y Arteaga, R. R. (1989). *Meteorología agrícola*. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación, Chapingo, México, segunda edición.
- SARH-INIA-CAETECA (1982). Guía para la asistencia técnica agrícola. área de influencia del campo agrícola experimental tecamachalco. Inf. téc., Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, CAETECA, Puebla, México.

## Bibliografía

---

- SIAP (2010). Situación actual y perspectivas del maíz 1996-210. SIAP- SAGARPA.
- SIAP (2016). Servicio de información y estadística agroalimentaria y pesquera. [www.siap.gob.mx](http://www.siap.gob.mx). Consulta: enero de 2015.
- Thom, H. C. S. (1959). The distributions of freeze-data and freeze-free period for climatological series with freeze-less years. *Mon. Wea. Rev.*, 87, 4, 136–144.
- Thom, H. C. S. y Shaw, R. H. (1958.). Climatological Analysis of Freeze Data for Iowa. *Mont Weatlwrr Review*, 86, 7, 251–257.
- Torres, E. (1995). *Agrometeorología*. Editorial Trillas, México.
- Torres, R. E. (1983). *Agrometeorología*. Editorial Diana, México.
- Vazquez, P. M. A., Ortíz, S. C. A., Arteaga, R. R. y Pájaro, H. D. (1992). Un método simple para estimar el periodo libre de heladas en la República Mexicana. *Agrociencia*.
- Ventskevichh, G. Z. (1961). *Agrometeorology (Translated from Rusia)*. Israel Program for Scientific translation, Jerusalem.
- Von Mises, R. (1936). La distribution de la plus grande de n valeurs. *Rev. math. Union interbalcanique*, 1, 1.
- Wang, J. Y., Brutin, M. D., Luchessa, C. E. y Roper, T. J. (1982). *The Grower Weather Guide for Farming Practices*. Milieu. Information Services, Inc., San José, California.
- Weibull, W. (1939). *A statistical theory of the strength of materials*. 151. Generalstabens litografiska anstalts förlag.
- Wilsie, C. P. (1966). *Cultivos: Aclimatación y Distribución*. Ed. Acribia, Zaragoza, España.

# Anexos

## Anexo A: Algoritmo para Estimación de la Última Helada, Primera Helada y Periodo Libre de Heladas

```
#:.....  
Codigo en R  
  
#:.....  
# Preparación de los datos  
  MAT481 # Es un data.frame de 11323 filas y 482 columnas.  
# La primer columna "Fecha" contiene la serie de fechas desde el 1o. de enero de  
# 1980 a 31 de diciembre del 2010, en formato aaaa-mm-dd. El resto de las colum-  
# nas, contienen los datos de temperatura mínima diaria registrado en cada una de  
# las estaciones meteorológicas. Cada columna representa una estación meteoroló-  
# gica y son nombradas y ordenadas cronologicamente por su ID. Tip: Dado que el  
# ID es numérico, para nombrar las columnas, se inserta la letra E antes del ID.  
# Ej. La columna de la Estación 09014 se llama "E09014".  
  
# Construcción de matrices auxiliares  
# Dato: Fechas + Temperatura  
  
  MAT481F.1<-cbind(ddmm=substr(MAT481[,1],6,10),day=substr(MAT481[,1],9,10),  
                  Month=substr(MAT481[,1],6,7),Year=substr(MAT481[,1],1,4),  
                  MAT481)  
  
# Dato: Si hubo una helada, el dato se reemplaza con el año correspondiente.  
  MAT481F.2<-as.data.frame(cbind(MAT481F.1[c(1,4)],ifelse(MAT481F.1[,-c(1:5)]<=0,  
                  as.numeric(substr(MAT481F.1[,5],1,4)),NA)))  
  
#:.....
```

## Anexos

```
# Ingresar datos de la Estación Meteorológica, servirán posteriormente
IDEst<-15010 # Anotar el ID de la Estación Meteorológica asignado por el SMN
NombEst<-"ATOTONILCO, ALMOLOYA DE JUAREZ, MEX." # Nombre entre comillas
AltEst<- 2557 # Altitud de la estación en m.s.n.m.
N=31 # Número de años a estudiar. En este caso de 1980 al 2010 son 31 años

# 1. Gráfica de ocurrencia de heladas. Exploración de la distribución de fechas

EstMet<- j # j= j-ésima estación. Ej. j=299 (la 299a. estación de la matriz)
plot(subset(MAT481F.2,Year==1980)[,1],subset(MAT481F.2,Year==1980)[,EstMet+2],
      xlim=c(0,440), ylim=c(1979,2011),xaxt = "n",pch=1,xlab="Meses",
      ylab="A\\UF1o" , main="Fechas de Ocurrencia de Heladas", cex=50)
abline(v=c(1,31,334,366), h=c(1980:2010) ,col="grey90")
abline(v=c(-20:-1,367:490),col="white",lwd=4)
Siembra<-abline(v=c(59,90,120,151),col="green")
Cosecha<-abline(v=c(212,243,273,304),col="blue");
Medio.Año<-abline(v=183,col="red")
mtext(paste(IDEst,NombEst,sep = " "))
sequ<-c("Ene", "Feb", "Mar", "Abr","May", "Jun", "Jul", "Ago", "Sep", "Oct",
        "Nov", "Dic","")
axis(1, c(1,31,59,90,120,151,183,212,243,273,304,334,366), sequ,cex=.48)
for (i in 1981:2010)
{
  plot(subset(MAT481F.2,Year==i)[,1],subset(MAT481F.2,Year==i)[,EstMet+2],
        axes=F,add=TRUE)
}
legend(370,2010, c("Siembra","Cosecha"," ","1 julio"), col = c("green","blue",
  "white","red"), lty = 1,bty = "n", cex=.9,merge = TRUE,title = "Meses de:")
legend(380,1999, c("Presencia","de Helada"), col = c("black","white"),
  pch = 1,bty = "n",cex=.9,merge = TRUE)
box()

#::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
# 2. Estimación de probabilidades de ocurrencia de heladas

# Ingresar el día juliano de la Última Helada en "UH" y la Primera Helada en "PH"
# En los años en que no se tiene dato se anota: NA
UH<-c(61,83,68,118,105,56,95,89,111,129,81,90,112,NA,NA,101,100,120,124,75,
      109,90,37,122,95,129,106,153,101,122,128)
PH<-c(318,315,309,323,315,308,300,289,307,345,315,313,326,NA,348,282,314,291,
      NA,296,314, 294,321,310,311,266,302,268,275,310,273)

# 2.1 Estimación de PARÁMETROS de las distribuciones: Weibull y Normal
library("fitdistrplus")
Date.UPH<-data.frame(ULTIMA.H=UH,PRIMERA.H=PH)
row.names(Date.UPH)<-(c(1980:2010));Date.UPH # Datos: Primera y última helada
```

```

# a) Última helada: Ajuste de la Distribución Normal y Weibull
Par.NWu<- data.frame(matrix(ncol=5,nrow=1))
Par.NWu[,1] <- paste("E",IDEst,sep = "")
colnames(Par.NWu)<-c("Estación","Normal: mean","Normal: sd","Weibul: shape",
                    "Weibul: scale")
x<-as.vector(na.omit(na.omit(Date.UPH[,1])))
fit.nor<-fitdist(x,"norm")
fit.wei<-fitdist(x,"weibull")
Par.NWu[1,2:3]<-fit.nor$estimate
Par.NWu[1,4:5]<-fit.wei$estimate
Par.NWu          # Par.NWu: Cuadro de parámetros estimados para datos de UH

# b) Primera helada: Ajuste de la Distribución Normal y Weibull
Par.NWp<- data.frame(matrix(ncol=5,nrow=1))
Par.NWp[,1] <- paste("E",IDEst,sep = "")
colnames(Par.NWp)<-c("Est","Normal: mean","Normal: sd","Weibul: shape",
                    "Weibul: scale")
x<-as.vector(na.omit(Date.UPH[,2]))
fit.nor<-fitdist(x,"norm")
fit.wei<-fitdist(x,"weibull")
Par.NWp[1,2:3]<-fit.nor$estimate
Par.NWp[1,4:5]<-fit.wei$estimate
Par.NWp          # Par.NWp: Cuadro de parámetros estimados para datos de PH

# 2.2 Estimación de la Distribución Empírica y Teórica Ajustada
xs<-as.vector(sort(na.omit(Date.UPH[,1]))) # Columna 1: Es la PH.
xa<-as.vector(sort(na.omit(Date.UPH[,2]))) # Columna 2: Es la UH.
Ms<-length(xs) # Núm. de años con heladas
Ma<-length(xa)
Ps<-Ms/N # Proporción: años con Helada
Pa<-Ma/N
ks<-c(1:length(xs))
ka<-c(1:length(xa))

I_ast<-1-(ks/(Ms+1)) # Dist. Empírica de Última Helada
I_hat.n<-round(1-pnorm(xs,Par.NWu[1,2],Par.NWu[1,3]),3) # Normal de UH
I_hat.w<-round(1-pweibull(xs,Par.NWu[1,4],Par.NWu[1,5]),3) # Weibul de UH
H_ast<-I_ast*Ps # Dist. Empírica ponderada UH
H_hat.n<-I_hat.n*Ps # Dist. Normal estimada ponderada UH
H_hat.w<-I_hat.w*Ps # Dist. Weibul estimada ponderada UH

F_ast<-round(ka/(Ma+1),3) # Dist. Empírica de Primera Helada
F_hat.n<-round(pnorm(xa,Par.NWp[1,2],Par.NWp[1,3]),3) # Normal de PH
F_hat.w<-round(pweibull(xa,Par.NWp[1,4],Par.NWp[1,5]),3) # Weibul de PH
J_ast<-F_ast*Pa # Dist. Empírica ponderada
J_hat.n<-F_hat.n*Pa # Dist. Normal Estimada ponderada PH
J_hat.w<-F_hat.w*Pa # Dist. Weibul estimada ponderada PH

```

```

# Desactivar para guardar el gráfico ajustado deseado: la Normal ó Weibul
# pdf(file=paste("PLH-W",".pdf",sep=""),width=9, height=4.7)
# pdf(file=paste("PLH-N",".pdf",sep=""),width=9, height=4.7)
plot(1,type = "n", xlim = c(0,366), ylim=c(0,1.01),xaxt = "n",
     xlab="Días (Julianos)", ylab="Probabilidad",
     main="Probabilidad de Ocurrencia de Heladas",cex.axis = 0.9)
mtext(paste(IDEst, NombEst,sep = " "),cex =1) #Nombre de estación
lines(xs,I_ast,type = "l",lty=2);lines(xs,I_ast,type= "l",lty=2) #Empirica UH
lines(xa,F_ast,type = "l",lty=2);lines(xa,F_ast,type= "l",lty=2) #Empirica PH

lines(xs,I_hat.w,type = "l",col="blue",lty=1)           # Weibul ajustada de UH
lines(xa,F_hat.w,type = "l",col="blue",lty=1)           # Weibul ajustada de PH
# lines(xs,I_hat.n,type = "l",col="red",lty=1)           # Normal ajustada de UH
# lines(xa,F_hat.n,type = "l",col="red",lty=1)           # Normal ajustada de PH

axis(2,seq(0,1,by=.1),NULL,lwd = .5, lty = "solid",labels = F,col="gray40")
axis(1,seq(0,366,by=2),NULL,lwd = .5, lty = "solid",labels = F,col="gray50",
     cex.axis = 0.5)
axis(1,seq(0,366,by=10),NULL,lwd = 1, lty = "solid",labels = F,col="gray25")
axis(1,seq(0,366,by=20),NULL,lwd = 1.2, lty = "solid",labels = T,cex.axis=.9)
abline(v=c(0,31,59,90,120,151,183,212,243,273,304,334,366),lty="dotted",
       col="lightgray", h=seq(0,1,by=.2))
text(c(0,31,59,90,120,151,183,212,243,273,304,334)+16,1.02,c("Ene","Feb",
  "Mar","Abr","May","Jun","Jul","Ago","Sep","Oct","Nov","Dic"),cex = .6,
     col = "grey70")
# legend(148,1,c("Dist. Empírica", "Dist. Normal", "PLH (días)"),
#        col = c("black","red","gray20"),lty = c(2,1,1),bty = "n",merge = T,
#        cex = .8,title =paste("Altitud=",select.uh2[i,12],"m.s.n.m"))
legend(148,0.95, c("Dist. Empírica", "Dist. Weibull", "PLH (días)"),
       col = c("black","blue","gray20"), lty = c(2,1,1),bty = "n", merge = T,
       cex = .8, title =paste("Altitud=", AltEst, "m.s.n.m"))

prp<-c(0.2,0.1,0.05);prp      # Cuantiles de la primera helada 20%,10% y 5%
pru<-c(0.8,0.9,0.95);pru     # Cuantiles de la última helada20%,10% y 5%

# qu<-qnorm(pru,Par.NWu[1,2], Par.NWu[1,3])
# qp<-qnorm(prp,Par.NWp[1,2], Par.NWp[1,3])
# Fecha (dia juliano) de la última helada de cada cuantil
qu<-qweibull(pru,Par.NWu[1,4], scale = Par.NWu[1,5]);qu
# Fecha (dia juliano) de la primera helada de cada cuantil
qp<-qweibull(prp,Par.NWp[1,4], scale = Par.NWp[1,5]);qp

yi<-c(prp,prp, c(.2,.2,.05)) #prp)
yf<-c(prp,rep(0,6))
xi<-c(qu,qu,qp)
xf<-c(qp,qu,qp)

```

```

segments(xi,yi,xf,yf,lwd = 0.5,
         lty = c("solid","solid","solid","longdash","longdash","longdash",
                "longdash","longdash","longdash"))

plh<-c(round(qp)-round(qu)-1,round(qp[2])-round(qu[1])-1)

posx<-c(180); posy<-c(0.22,0.12,0.07,0.17)
text(posx,posy,paste(c(plh),c("(20%)","(10%)","(5%)","(20-10%)")),cex = .7)
lab<-c(round(qu,0),round(qp,0))
posx1<-c(round(qu,0),round(qp,0))
text(c(posx1),rep(-.015,6),lab,cex = 0.6)
text(c(16,350),0.09,c(expression("Última Helada"),expression("Primera Helada")),
     cex=.57,col = "gray35")
text(c(16,350),0.04,c(expression(P(X>x)),expression(P(X<=x))),cex=.64,
     col = "gray35")

# dev.off() #Sólo desactivar si se desactivó el comando pdf para guardar gráfico

# Tabla de resultados: Fechas estimadas de la PRimera y Última Helada.
Resultados<- data.frame(matrix(ncol=11,nrow=1))
colnames(Resultados)<-c("Est","UH 5%","UH 10%","UH 20%","PH 5%","PH 10%",
                       "PH 20%","PLH 5%","PLH 10%","PLH 20%","PLH 20%-10%")
Resultados[,1:11] <- c(paste("E",IDEst,sep = ""),round(c(qu,qp,plh),0))

#::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
# 3. Ajuste de la Intensidad de las últimas y primeras heladas
library(extRemes)
data.frame("y1"=ResTabM[[228]][,2],"y2"=ResTabM[[228]][,4])

y1<- c(0.0,0.0,-0.2,-0.4,-0.6,-0.1,0.0,0.0,-0.3,0.0,0.0,0.0,0.0,NA,NA,-1.3,
      -1.6,-0.5,0.0,-0.1,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0)
y2<-c(-2.4,0.0,-3.0,-1.0,-2.1,0.0,-1.5,-2.0,-2.6,0.0,-1.5,-5.0,0.0,NA,0.0,-0.5,
      -2.2,-1.0,NA,-2.0,0.0,0.0,-4.0,-1.0,-2.0,0.0,-1.0, 0.0, 0.0,-2.0,-1.0)

TempMin<-data.frame(Temp.UH=y1,Temp.PH=y2)
row.names(TempMin)<-c(1980:2010);TempMin #Temp. mín. registrada en PH y UH.

x1<- -na.omit(TempMin[,1])
x2<- -na.omit(TempMin[,2])
fit.x1<-fevd(x1,type ="GEV",method ="Lmoments")
fit.x2<-fevd(x2,type ="GEV",method ="Lmoments")

px1<-1-round(pevd(c(0,1,2,3), loc = fit.x1$results[1],scale=fit.x1$results[2],
                 shape = fit.x1$results[3]),4);px1
UR.tuh<- 1/px1;round(UR.tuh,2)
px2<-1-round(pevd(c(0,1,2,3),loc=fit.x2$results[1],scale=fit.x2$results[2],
                 shape = fit.x2$results[3]),4);px2

```

```
PR.tuh<- 1/px2;round(PR.tuh,2);c(px1,px2,UR.tuh,PR.tuh)

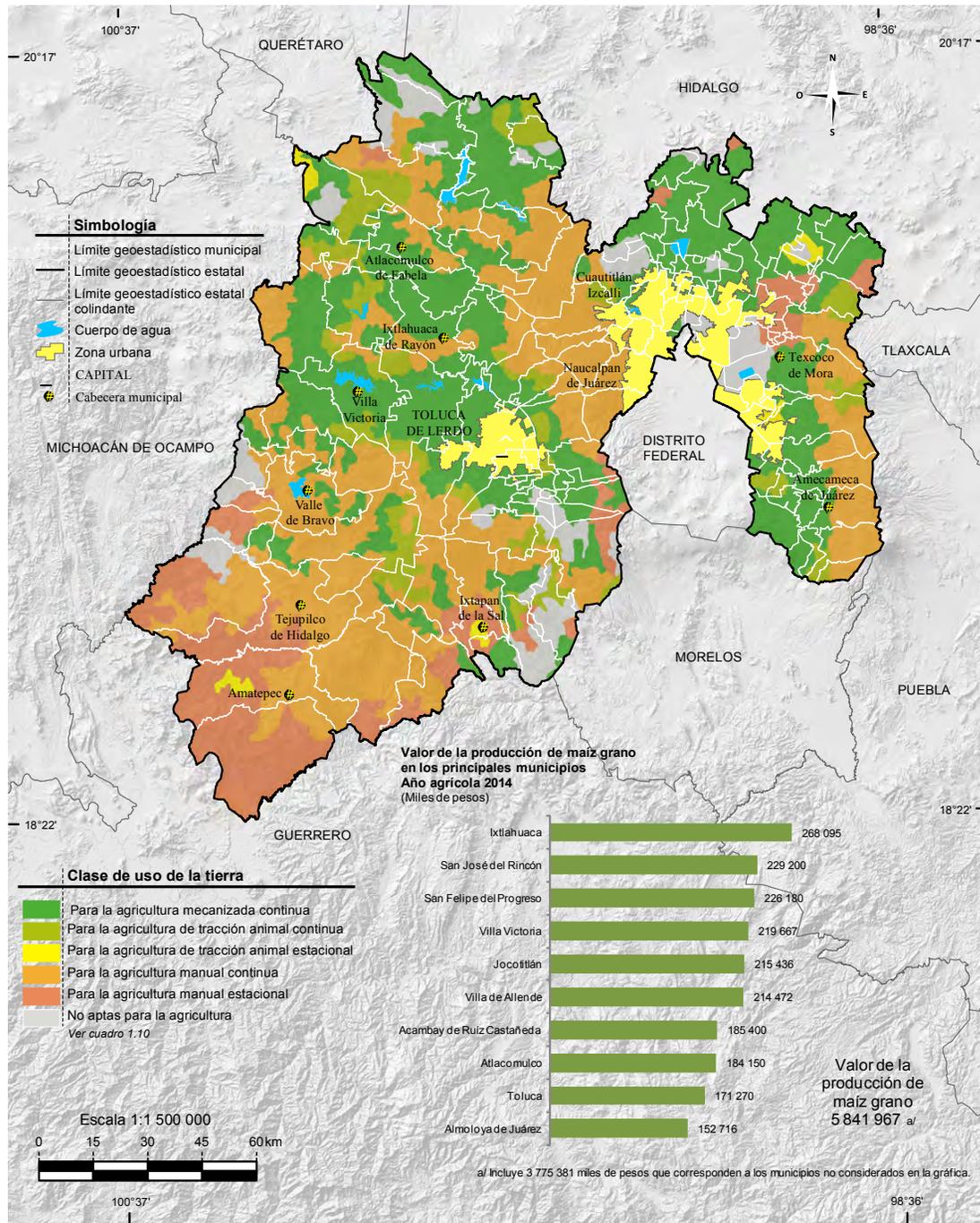
#Probabilidad de que la última o la primera helada alcance una intensidad de
# 0,-1,-2,-3°C
ProbIntensidad<- data.frame(matrix(ncol=9,nrow=1))
colnames(ProbIntensidad)<-c("Est","UH:0°C","UH:-1°C","UH:-2°C","UH:-3°C%",
                           "PH:0°C","PH:-1°C","PH:-2°C","PH:-3°C%")
ProbIntensidad[,1:9] <- c(paste("E",IDEst,sep = ""),round(c(px1,px2),4))
ProbIntensidad

# Periodo de Retorno de las diferentes intensidades
PRIntensidad<- data.frame(matrix(ncol=9,nrow=1))
colnames(PRIIntensidad)<-c("Est","UH:0°C","UH:-1°C","UH:-2°C","UH:-3°C%",
                           "PH:0°C","PH:-1°C","PH:-2°C","PH:-3°C%")
PRIIntensidad[,1:9] <-c(paste("E",IDEst,sep = ""),round(c(UR.tuh,PR.tuh),4))
PRIIntensidad

# Gráficos de Ajuste
plot(fit.x1)
plot(fit.x2)
```

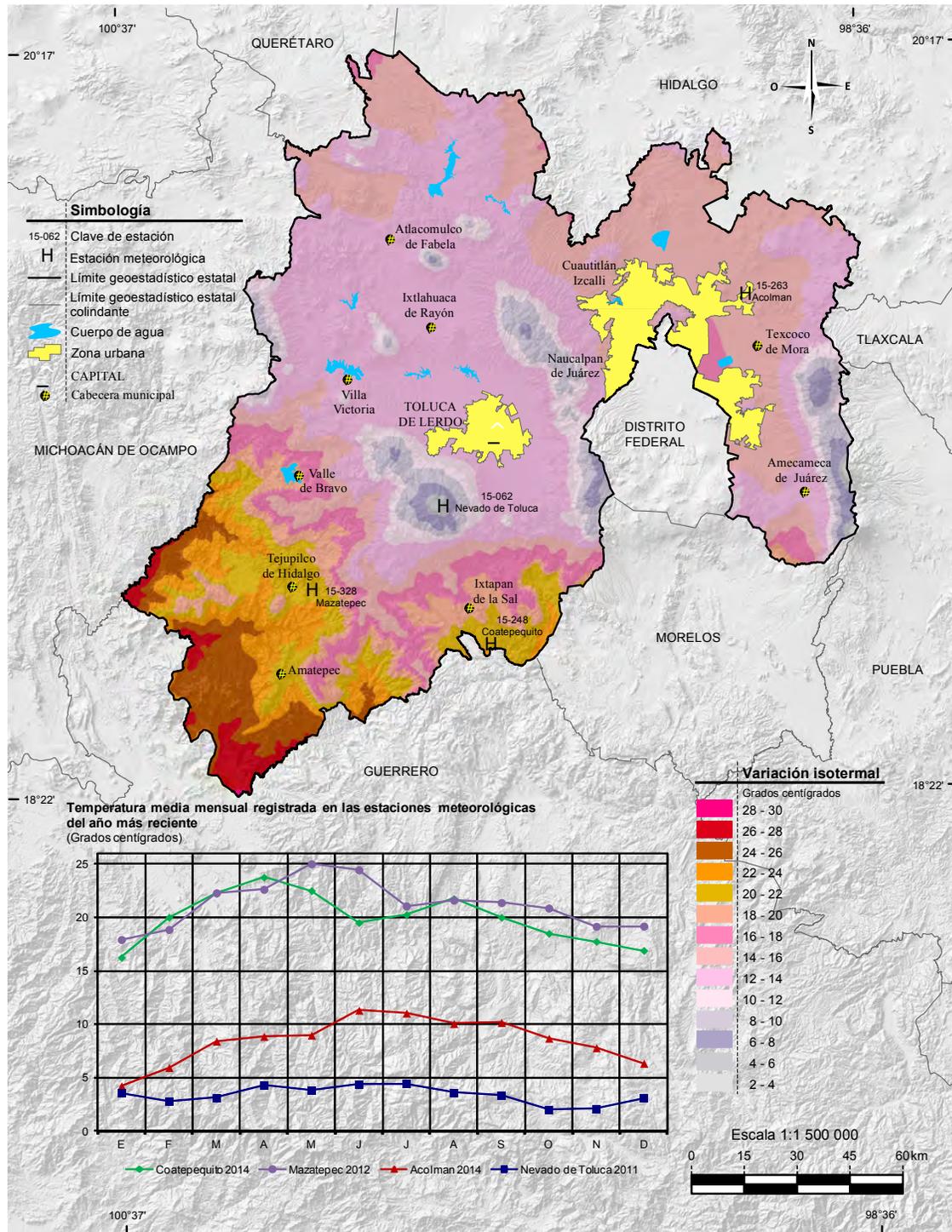
## Anexo B: Mapas de referencia

### B.1 Uso Potencial Agrícola



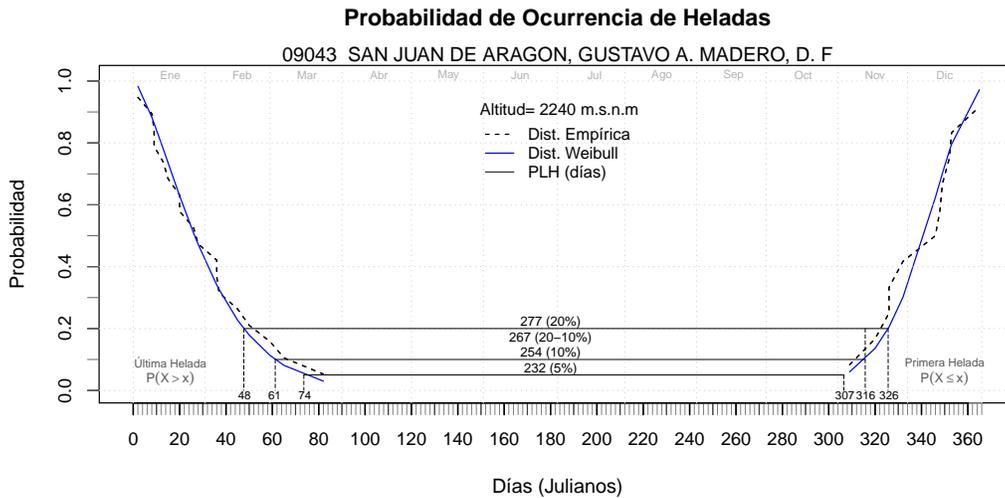
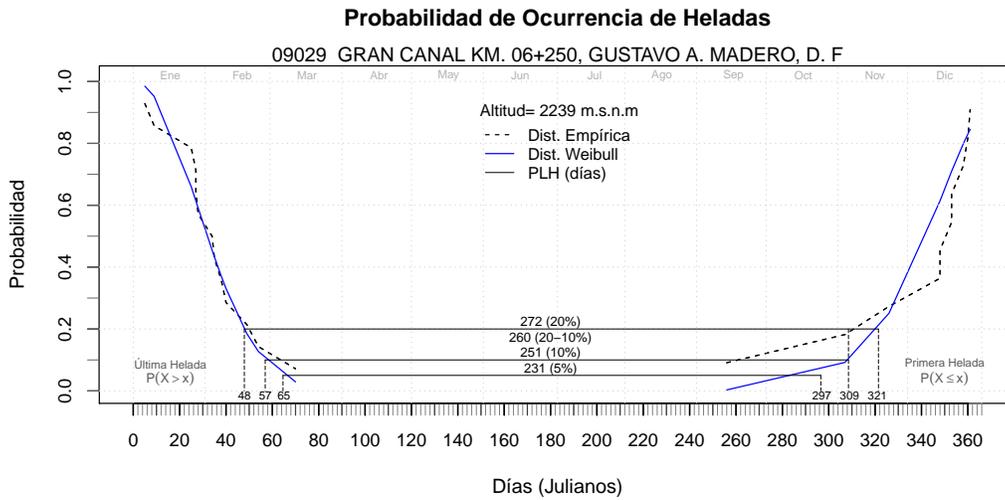
Fuente: INEGI, 2015. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta de Uso Potencial, Agricultura Escala 1:1 000 000, serie I. SAGARPA. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. [www.siap.gob.mx](http://www.siap.gob.mx) (16 de julio de 2015).

## B.2 Distribución de la temperatura



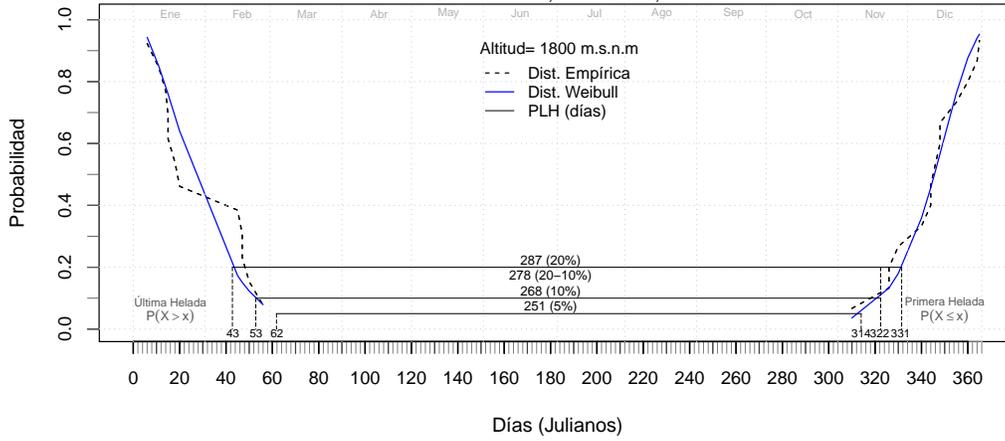
Fuente: INEGI, 2015. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta de Temperaturas Medias Anuales Escala 1:1 000 000, serie I.

## Anexo C: Gráficas de Probabilidad de Ocurrencia de la Primera y Ultima Helada



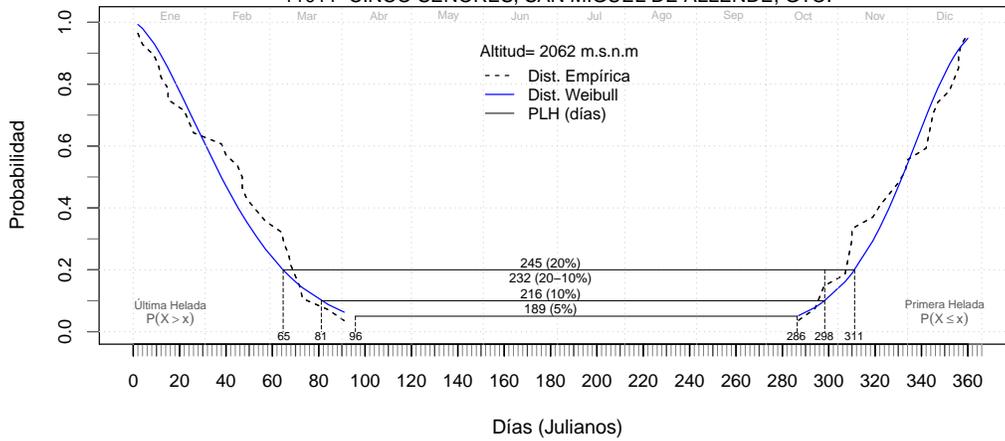
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11004 ALDAMA, IRAPUATO, GTO.



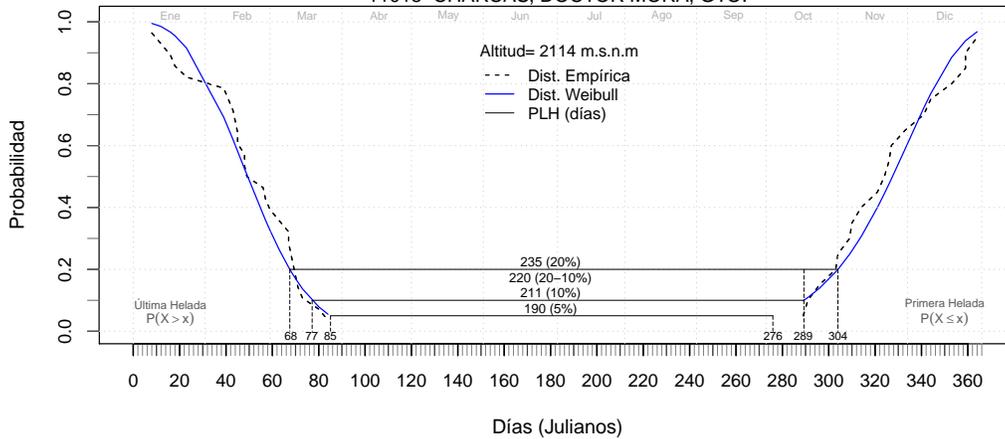
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11011 CINCO SEÑORES, SAN MIGUEL DE ALLENDE, GTO.

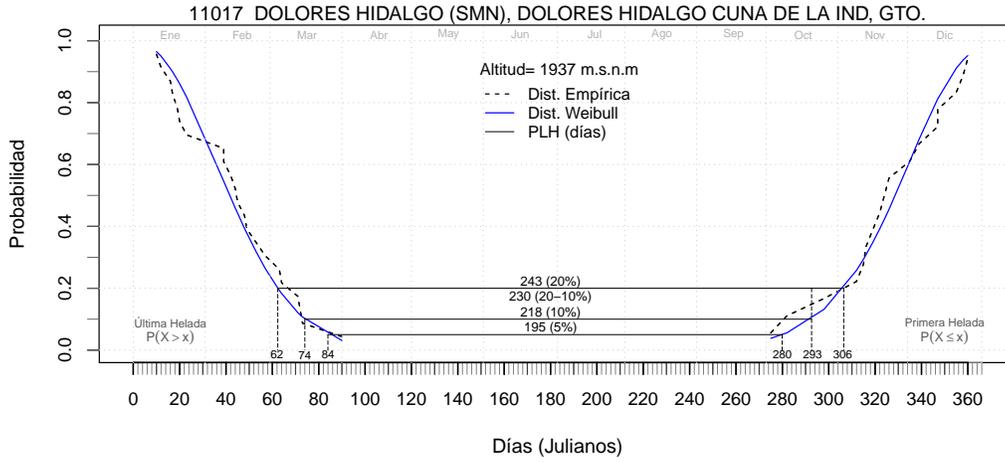


**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

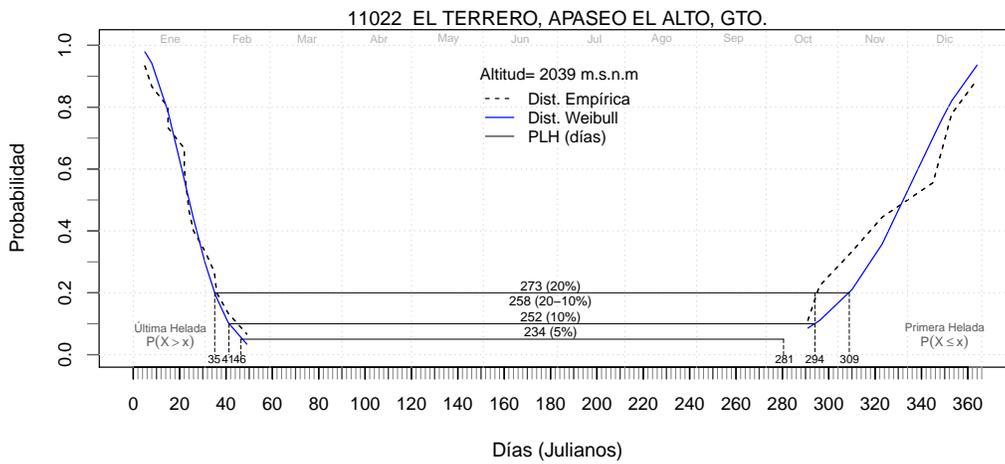
11015 CHARCAS, DOCTOR MORA, GTO.



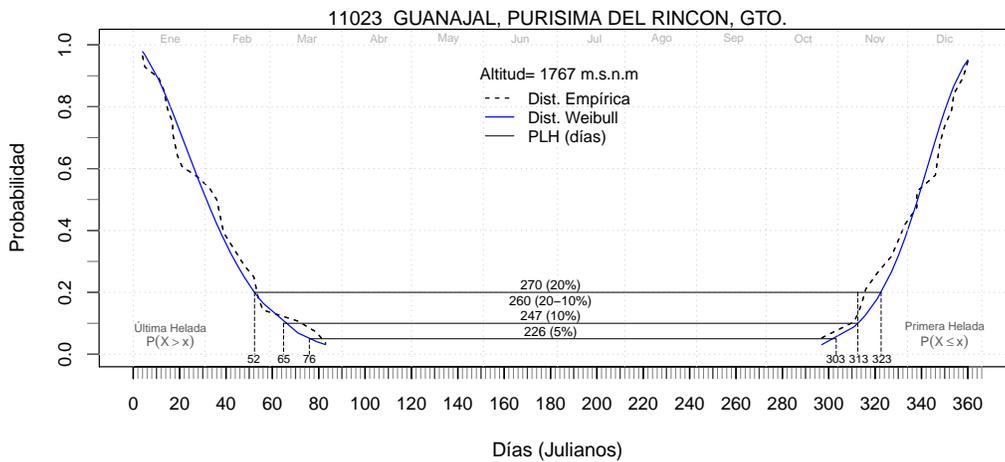
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**



**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

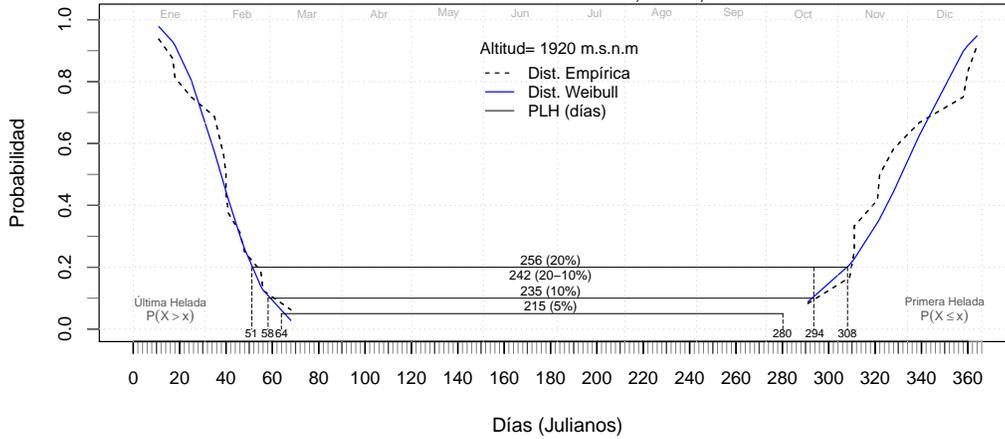


**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**



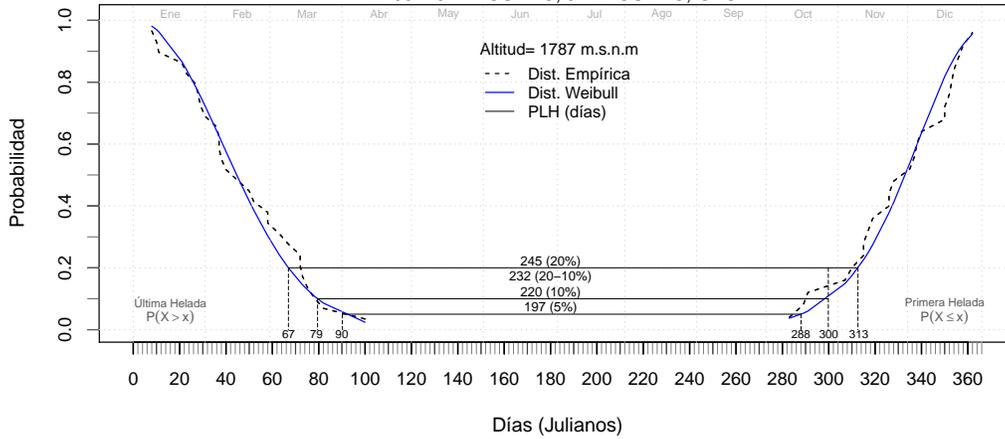
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11025 HACIENDA DE ARRIBA, LEON, GTO.



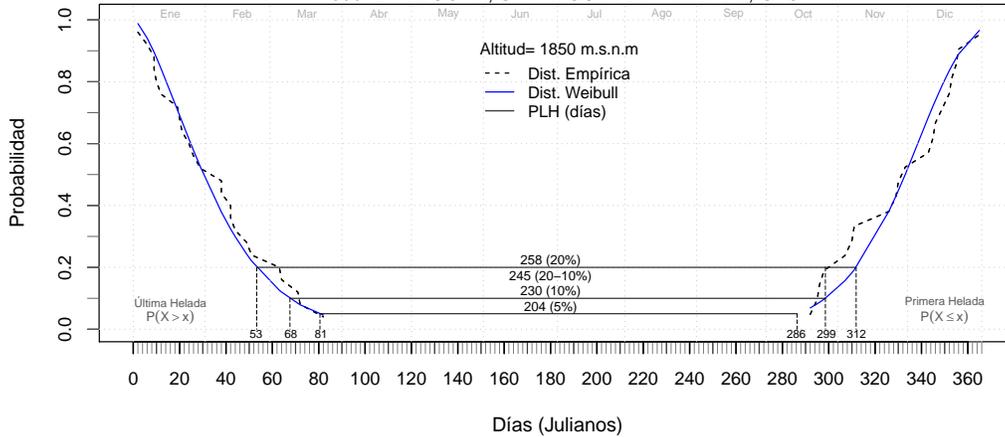
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11031 JERECUARO, JERECUARO, GTO.



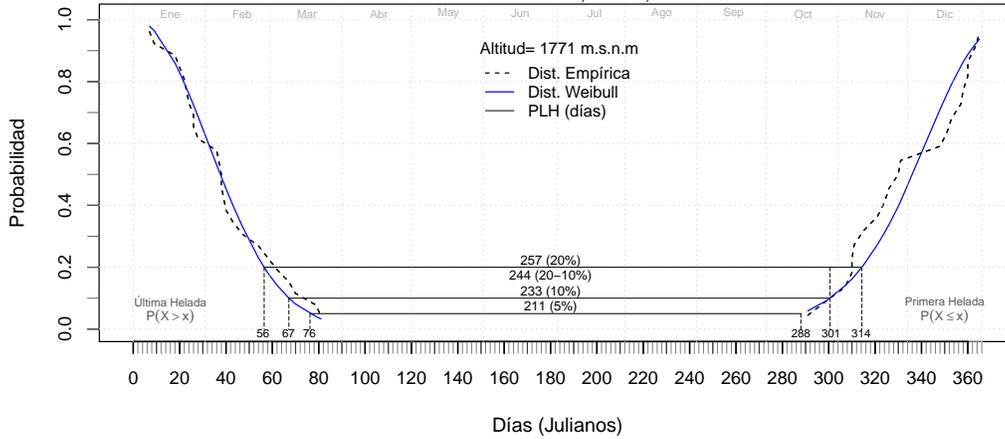
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11033 LA BEGOÑA, SAN MIGUEL DE ALLENDE, GTO.



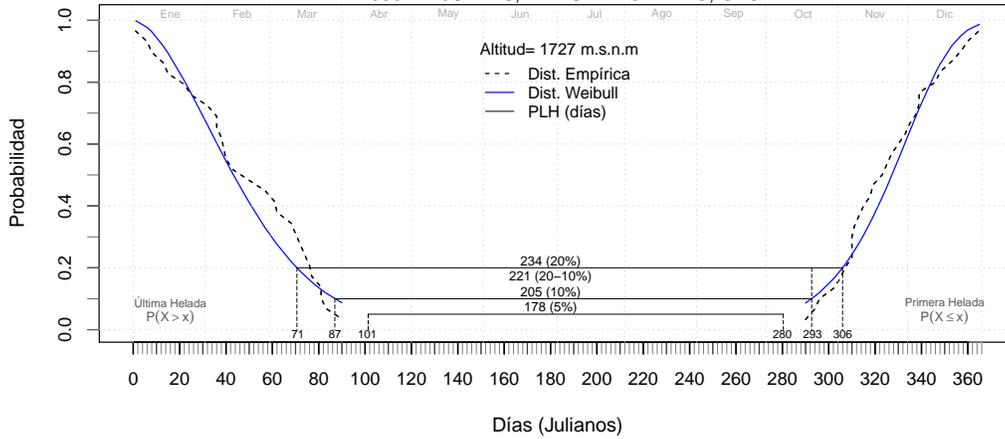
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11035 LA SANDIA, LEON, GTO.



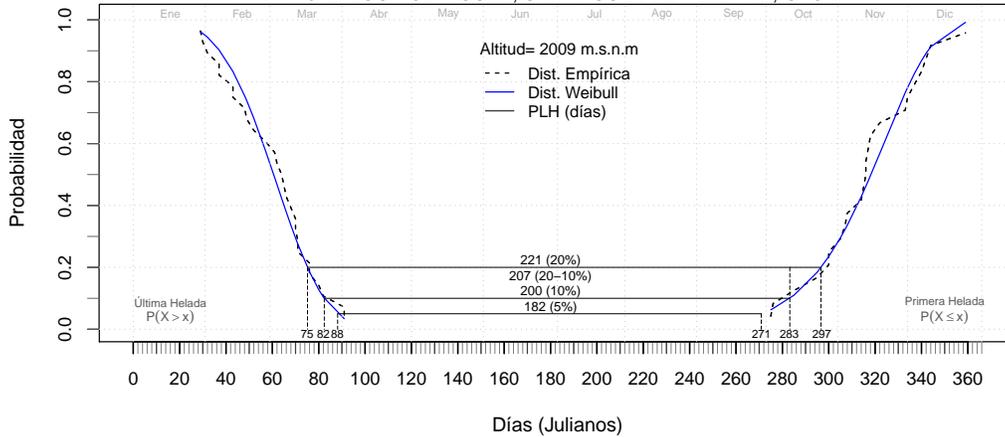
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11036 ADJUNTAS, MANUEL DOBLADO, GTO.



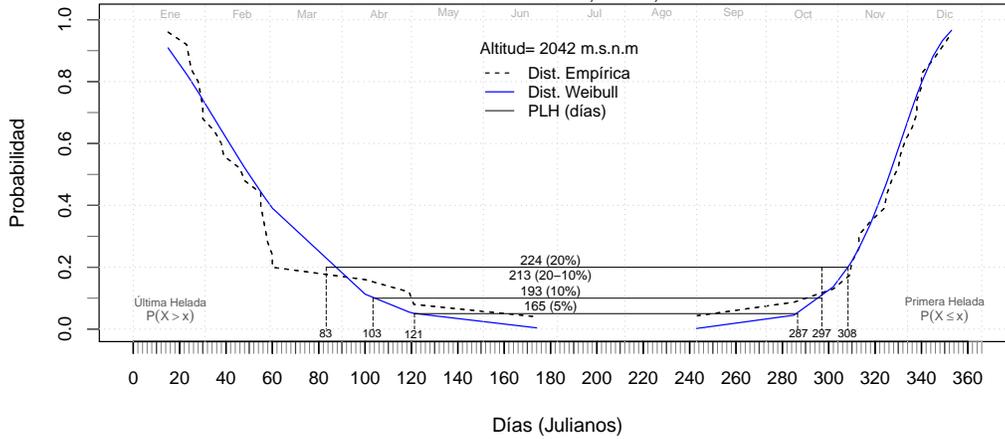
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11042 LOS RODRIGUEZ, SAN MIGUEL DE ALLENDE, GTO.



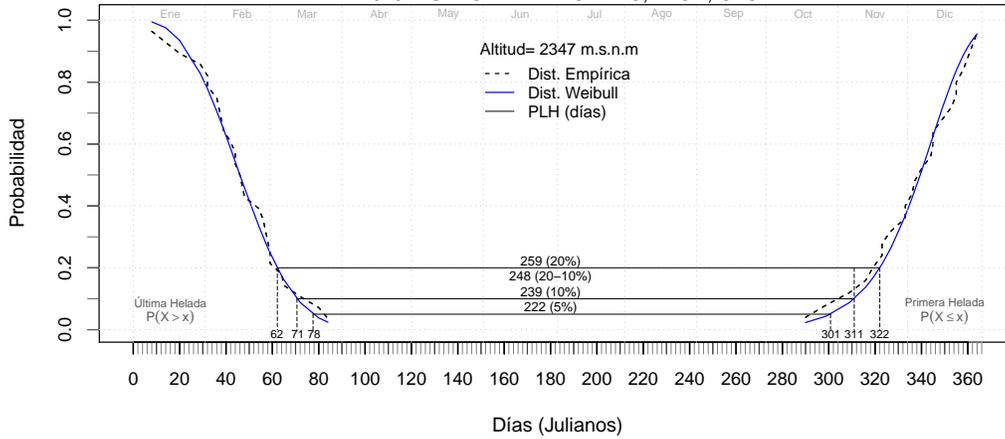
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11045 MEDIA LUNA, LEON, GTO.



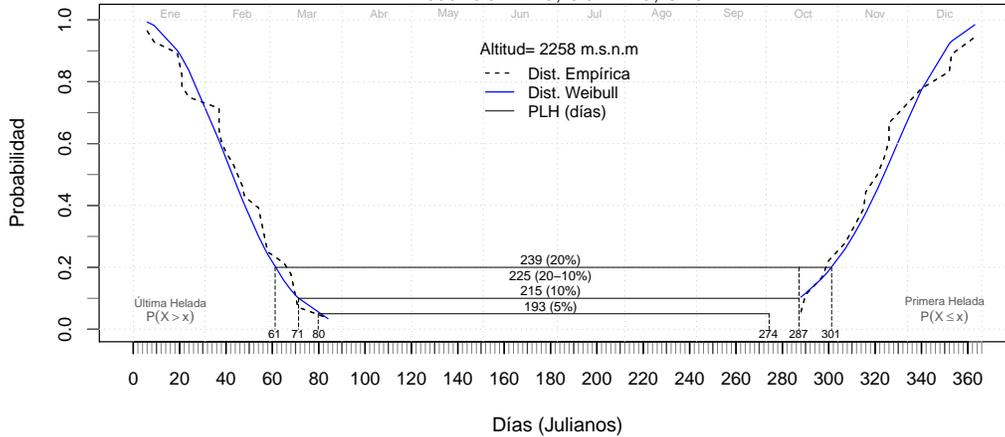
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11049 NUEVO VALLE MORENO, LEON, GTO.



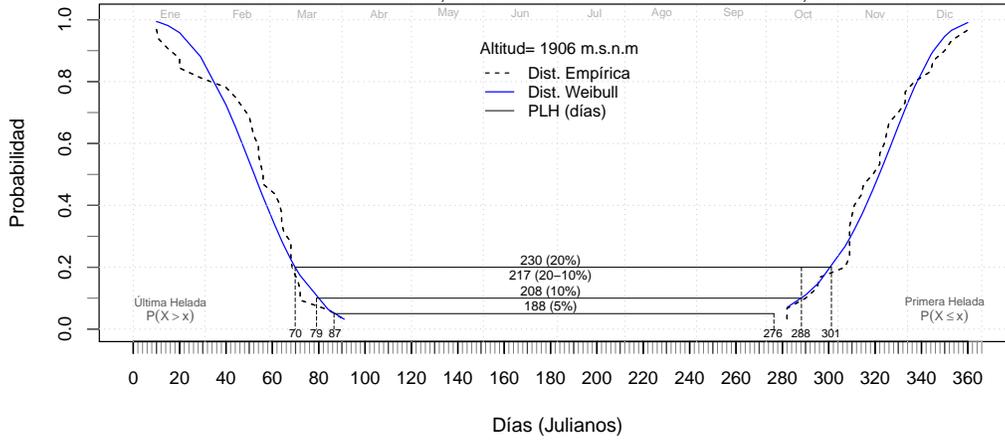
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11050 OCAMPO, OCAMPO, GTO.



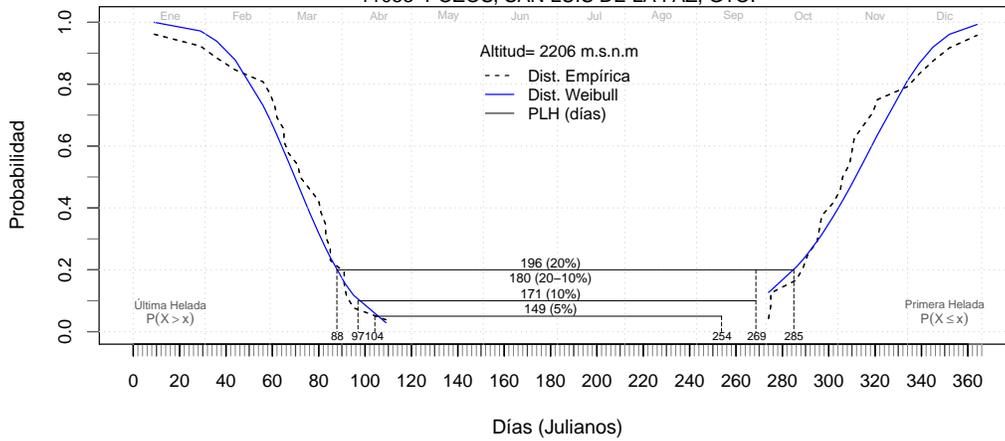
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11051 PEÑUELITAS, DOLORES HIDALGO CUNA DE LA IND, GTO.



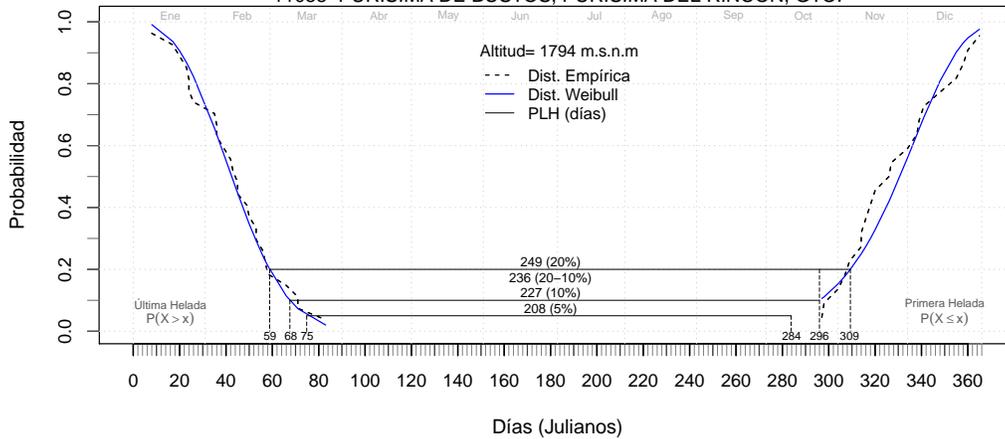
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11053 POZOS, SAN LUIS DE LA PAZ, GTO.



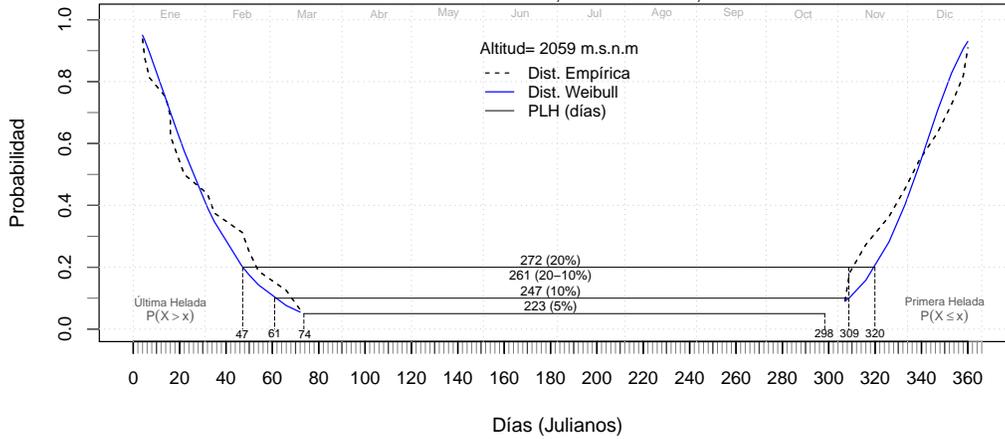
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11055 PURISIMA DE BUSTOS, PURISIMA DEL RINCON, GTO.



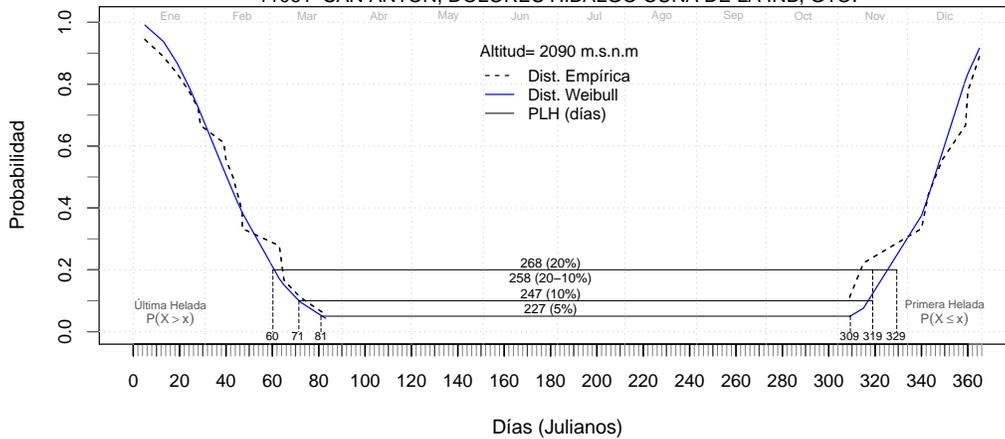
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11060 SALVATIERRA, SALVATIERRA, GTO.



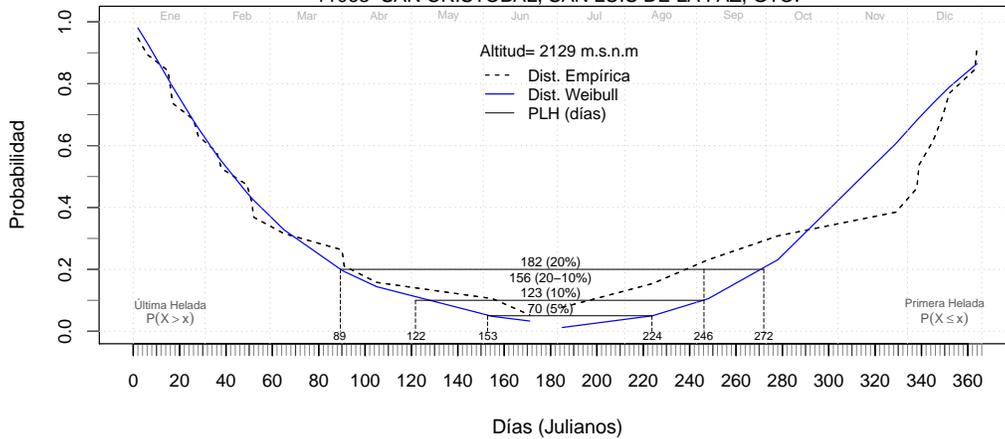
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11061 SAN ANTON, DOLORES HIDALGO CUNA DE LA IND, GTO.



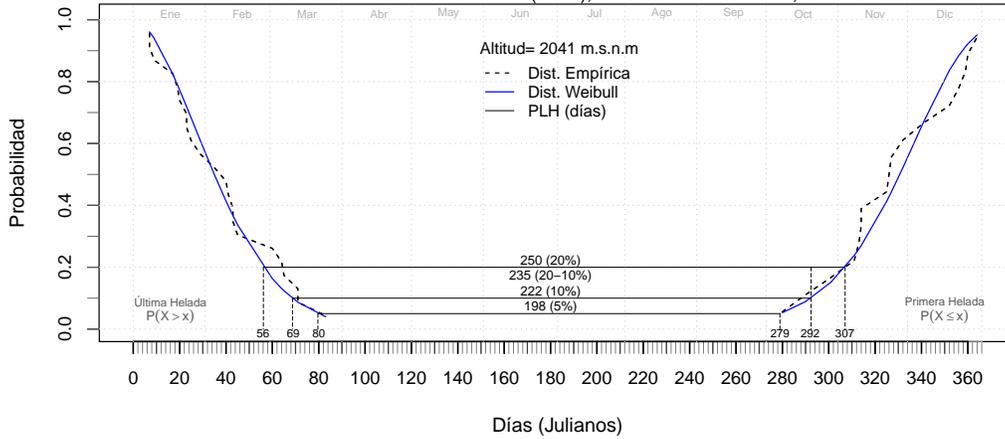
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11063 SAN CRISTOBAL, SAN LUIS DE LA PAZ, GTO.



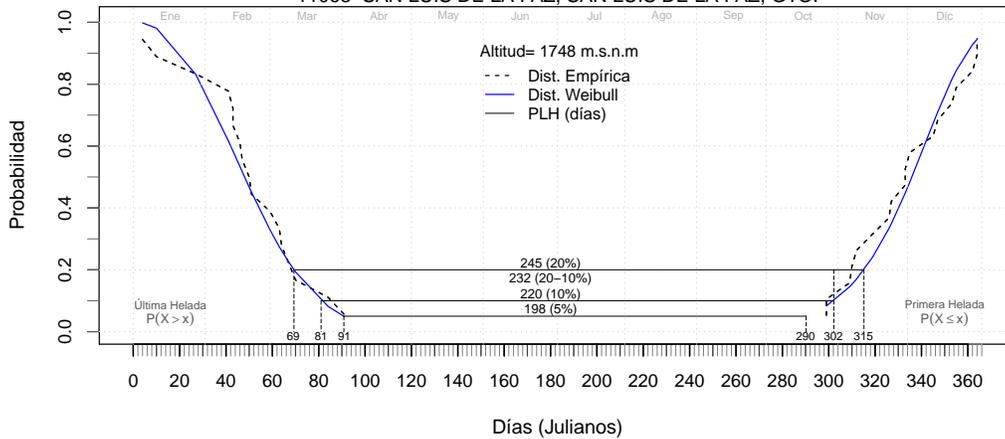
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11066 SAN JOSE ITURBIDE (SMN), SAN JOSE ITURBIDE, GTO.



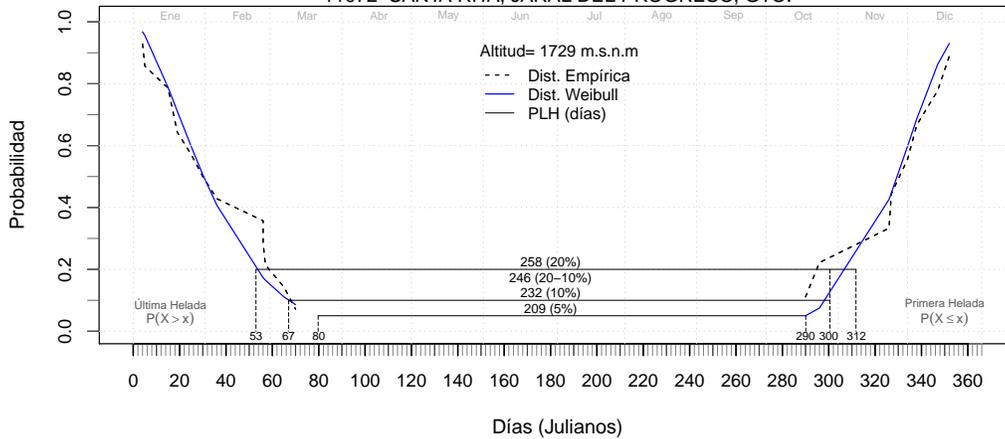
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11068 SAN LUIS DE LA PAZ, SAN LUIS DE LA PAZ, GTO.



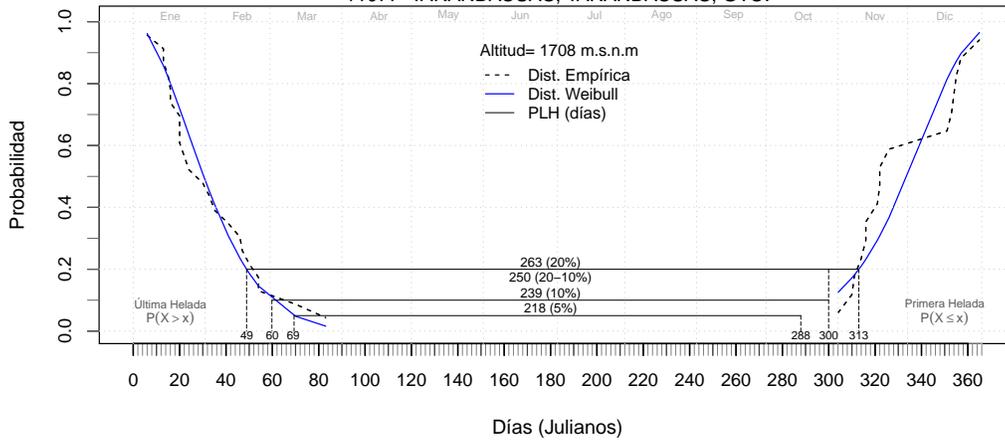
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11072 SANTA RITA, JARAL DEL PROGRESO, GTO.



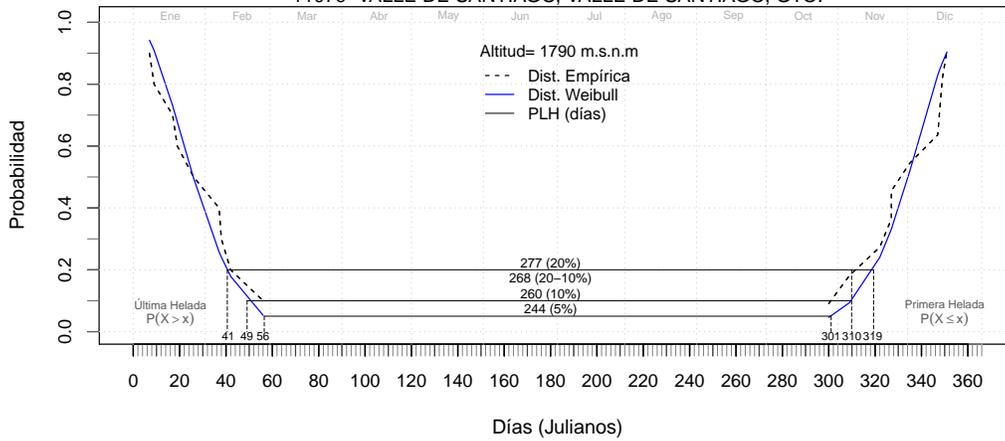
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11077 TARANDACUAO, TARANDACUAO, GTO.



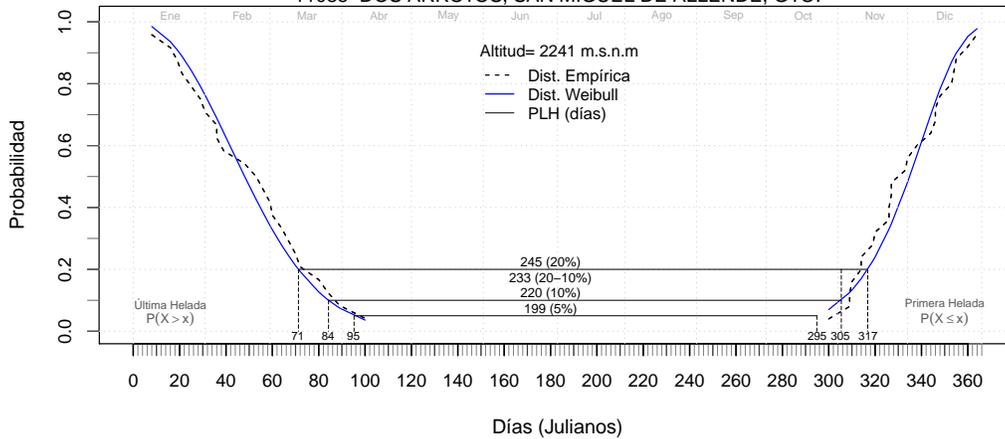
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11079 VALLE DE SANTIAGO, VALLE DE SANTIAGO, GTO.



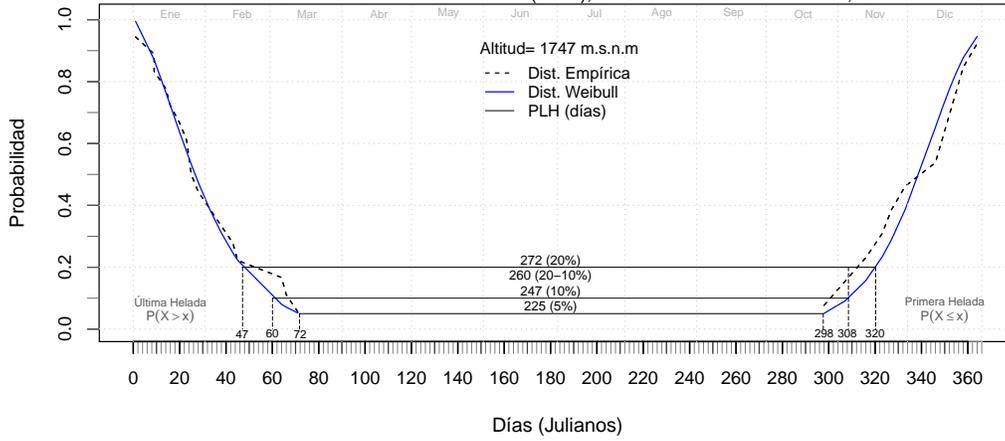
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11085 DOS ARROYOS, SAN MIGUEL DE ALLENDE, GTO.



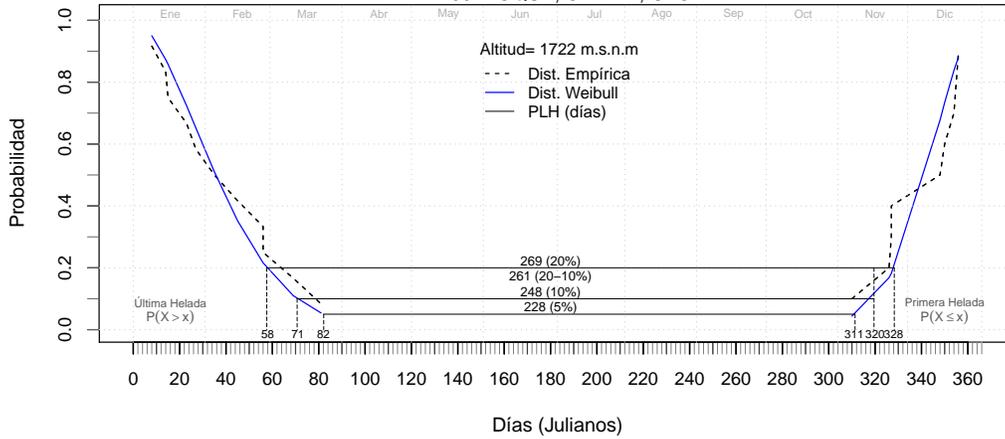
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11093 SAN MIGUEL DE ALLENDE (SMN), SAN MIGUEL DE ALLENDE, GTO.



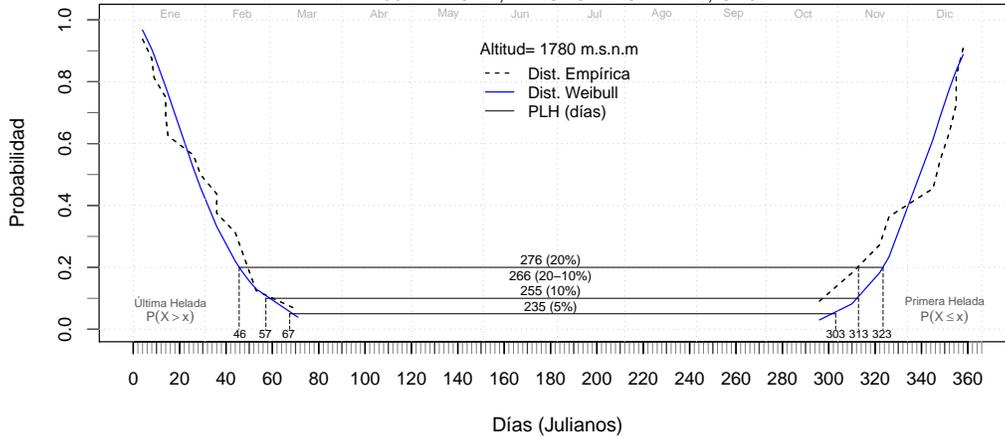
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11100 ROQUE, CELAYA, GTO.



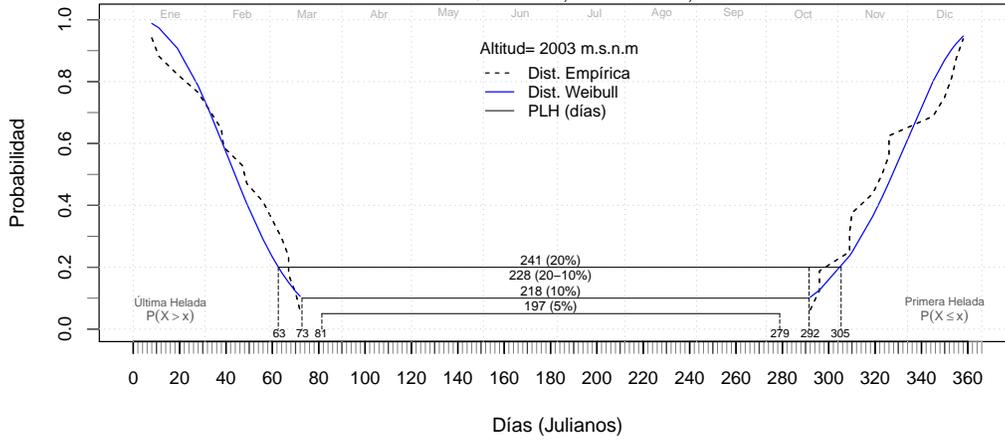
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11105 AMECHE, APASEO EL GRANDE, GTO.



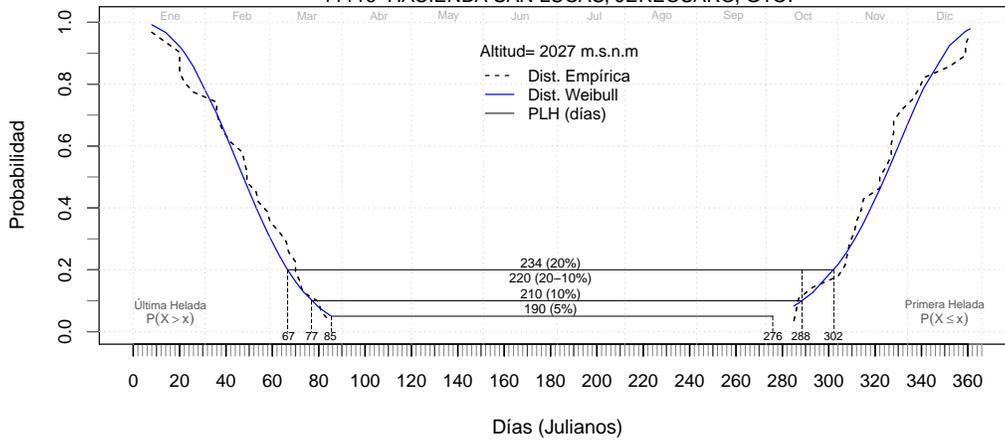
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11107 LA QUEMADA, SAN FELIPE, GTO.



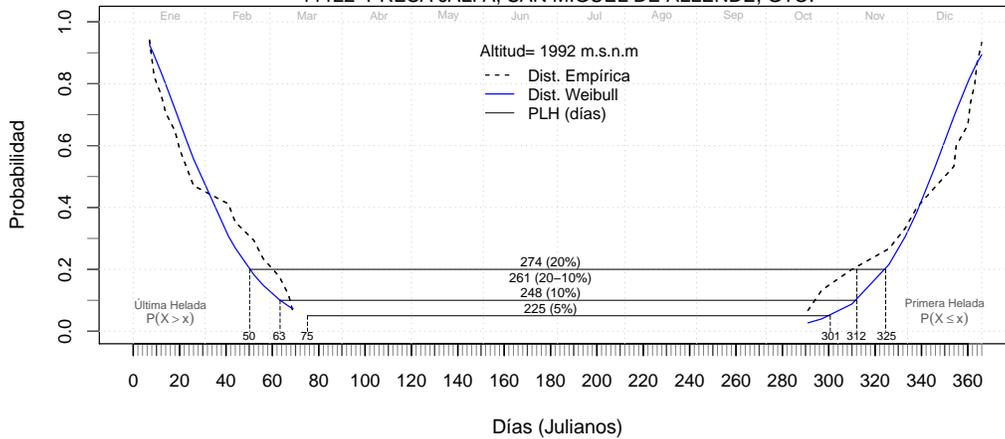
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11116 HACIENDA SAN LUCAS, JERECUARO, GTO.



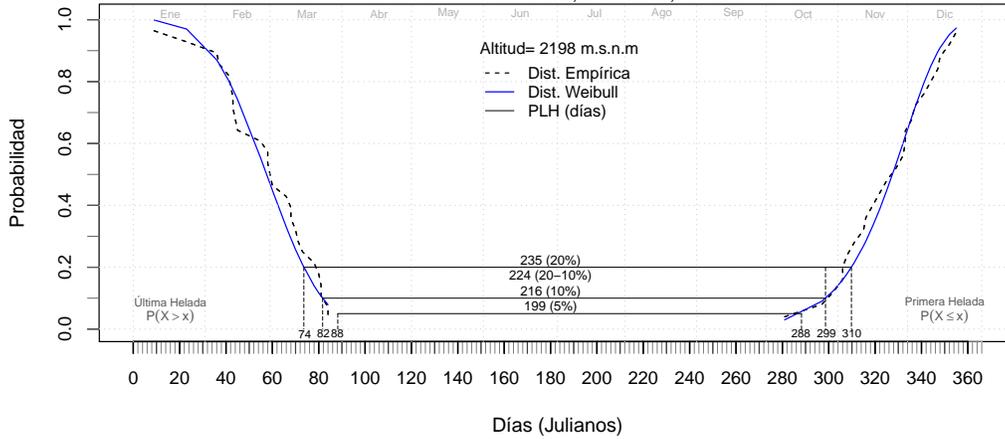
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11122 PRESA JALPA, SAN MIGUEL DE ALLENDE, GTO.



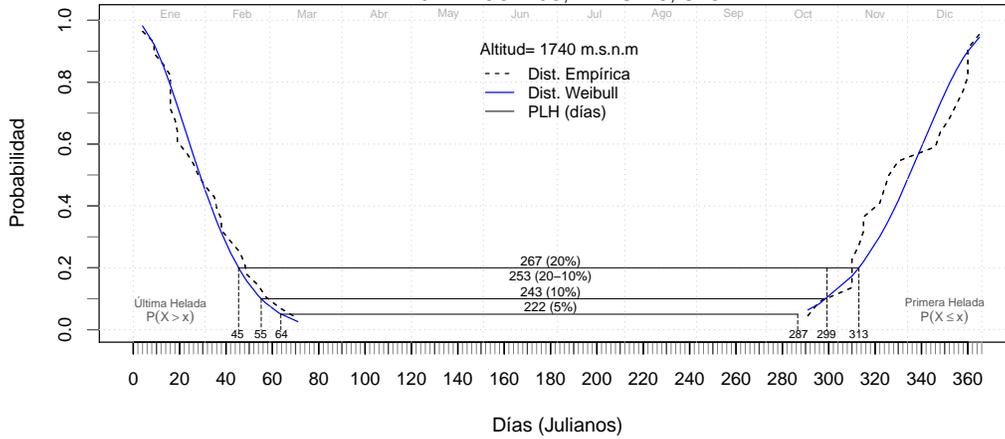
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11131 LAS TROJES, OCAMPO, GTO.



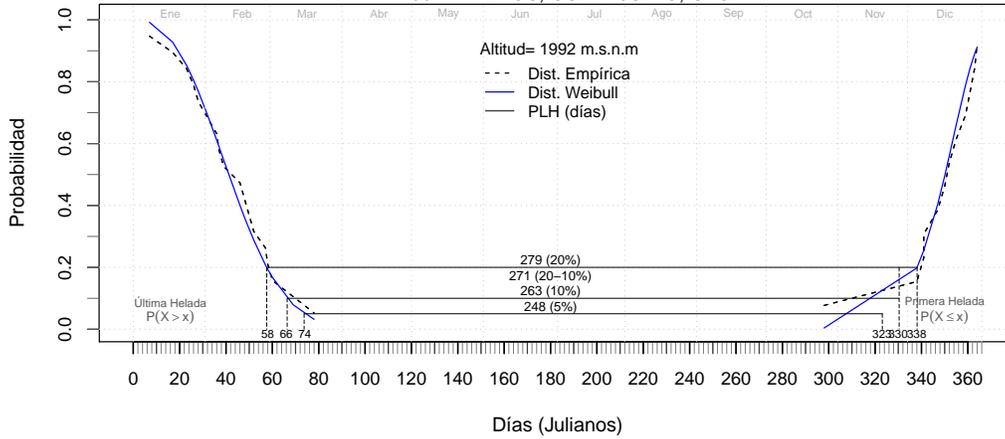
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11134 EL CONEJO, IRAPUATO, GTO.



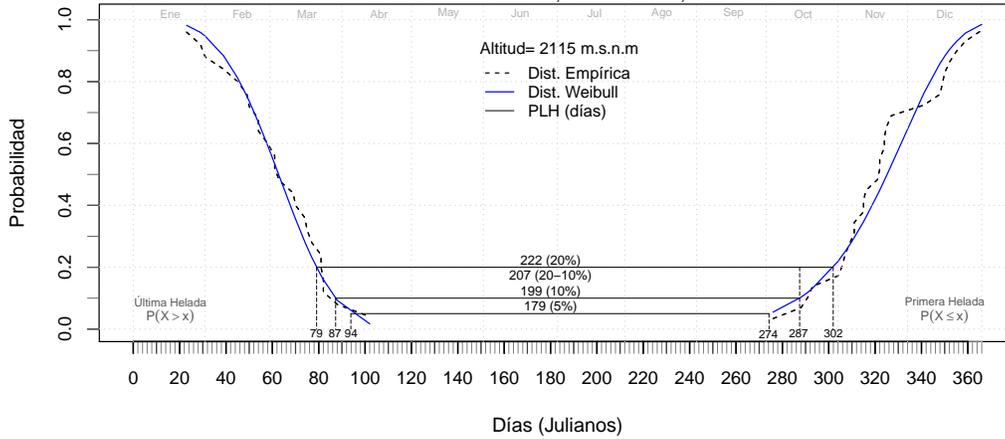
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11135 ARPEROS, GUANAJUATO, GTO.



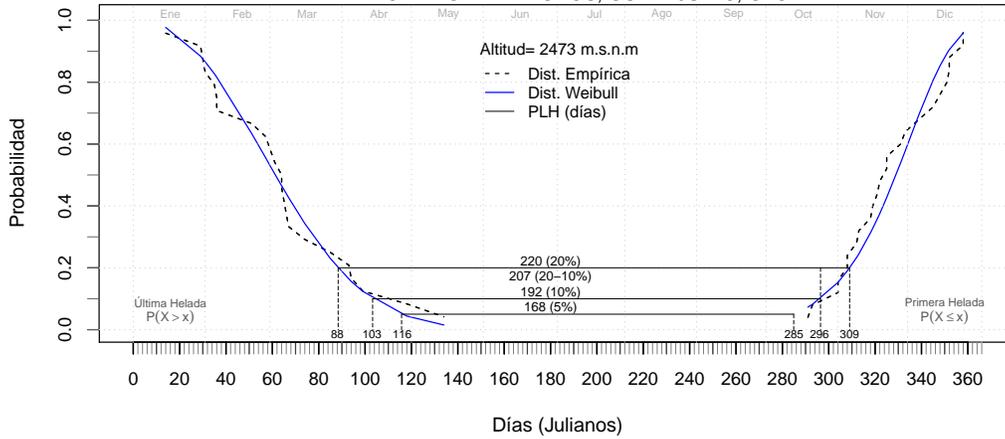
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11140 EL CARBON, SAN FELIPE, GTO.



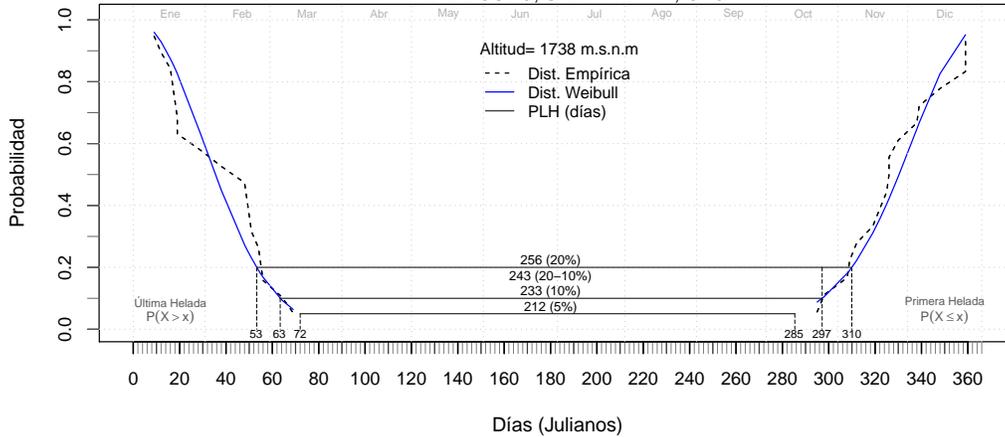
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11141 CIENEGA DE NEGROS, GUANAJUATO, GTO.



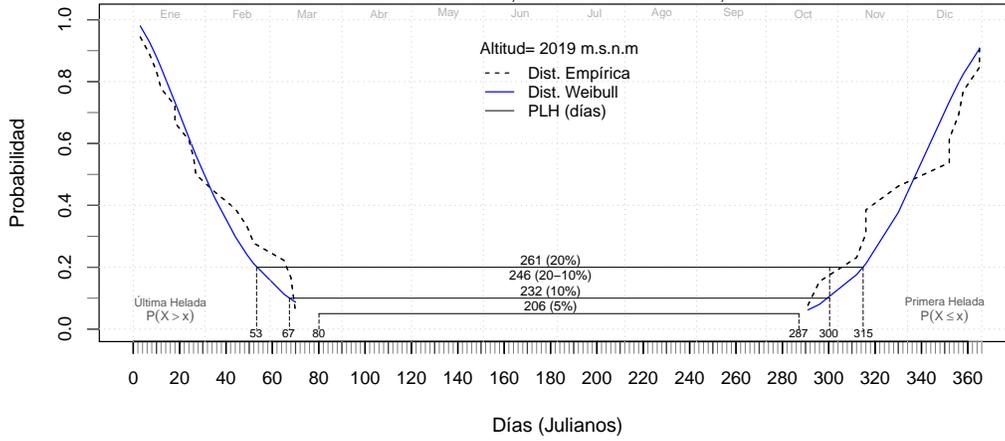
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11142 EL CUBO, SALVATIERRA, GTO.



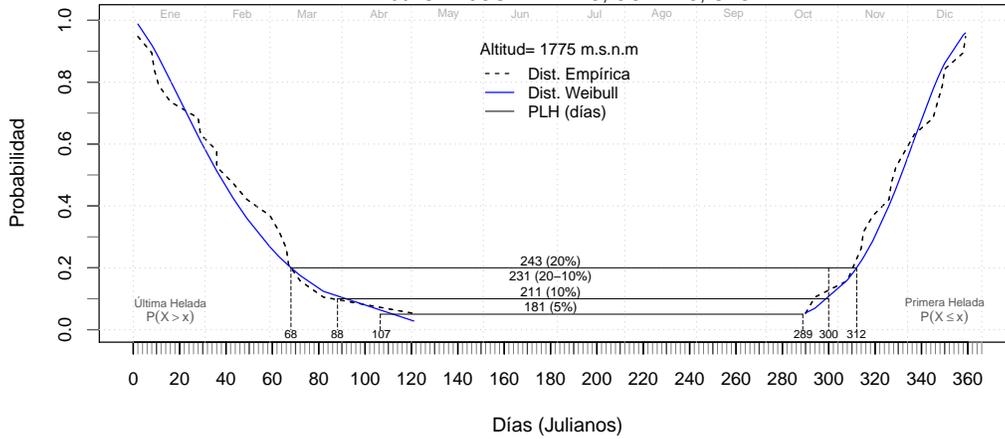
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11148 EL OBRAJE, APASEO EL GRANDE, GTO.



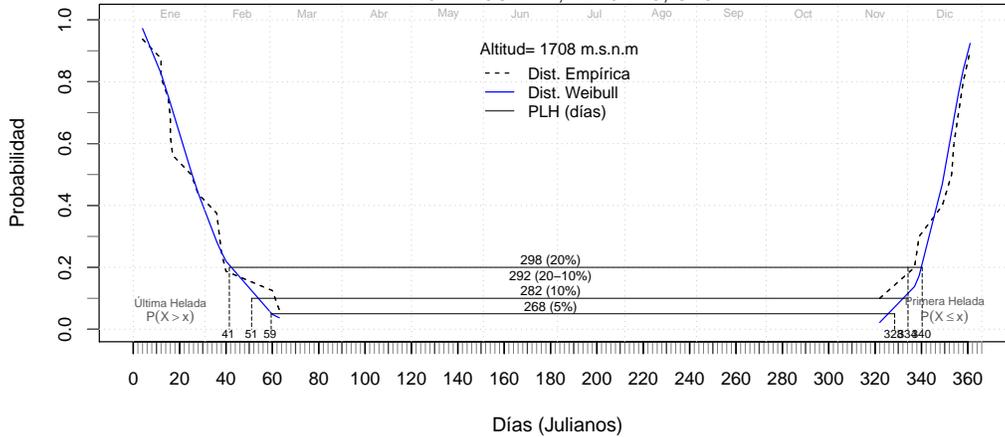
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11150 SAN JOSE EL ALTO, OCAMPO, GTO.



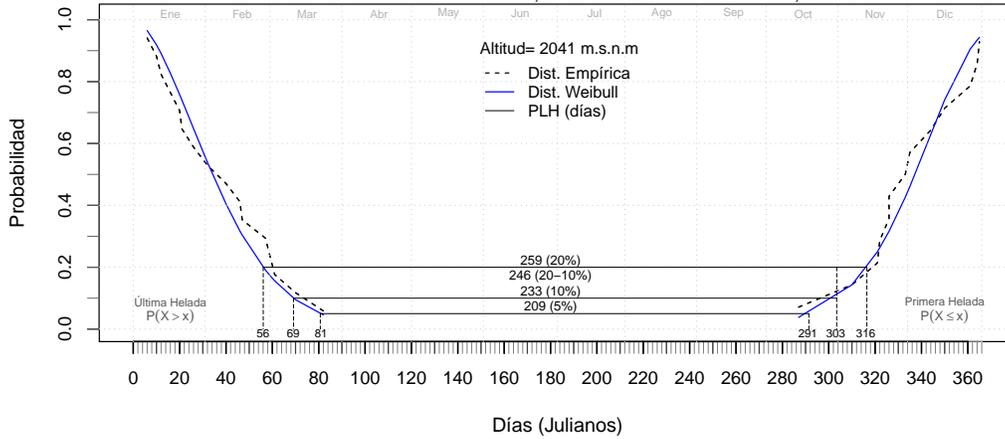
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11151 TACUBAYA, PENJAMO, GTO.



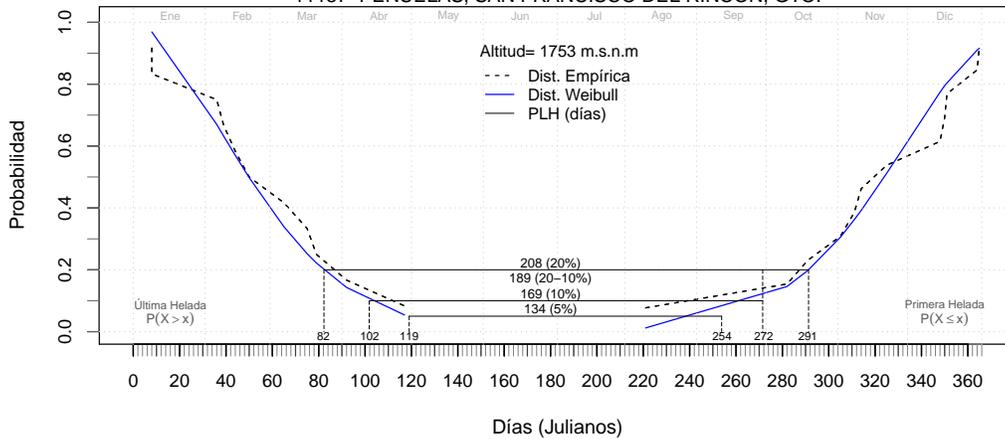
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11155 CORRAL DE PIEDRAS, SAN MIGUEL DE ALLENDE, GTO.



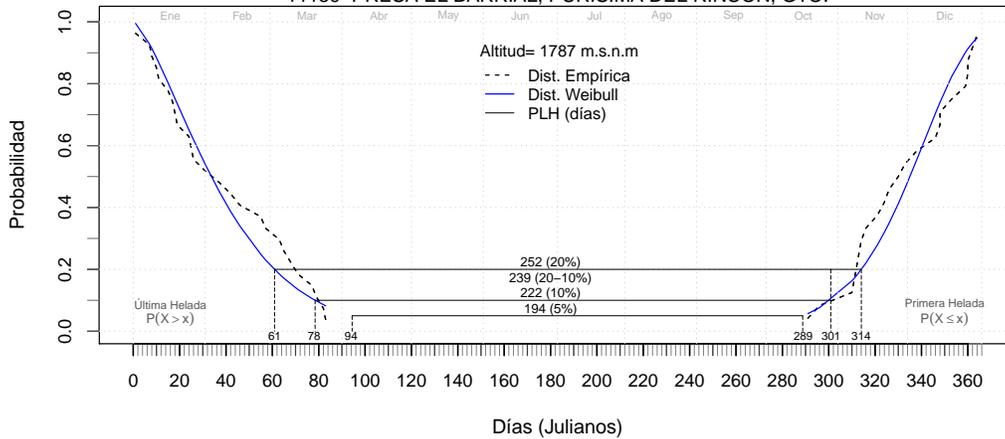
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11157 PEÑUELAS, SAN FRANCISCO DEL RINCON, GTO.



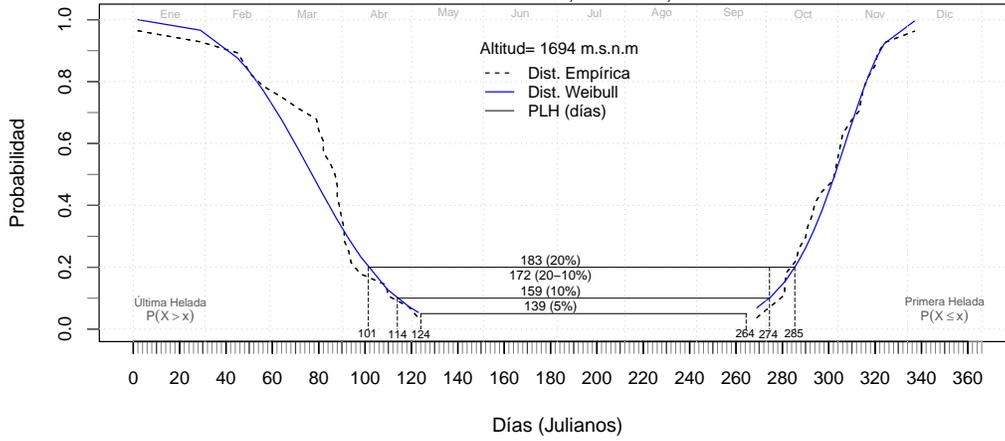
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11159 PRESA EL BARRIAL, PURISIMA DEL RINCON, GTO.



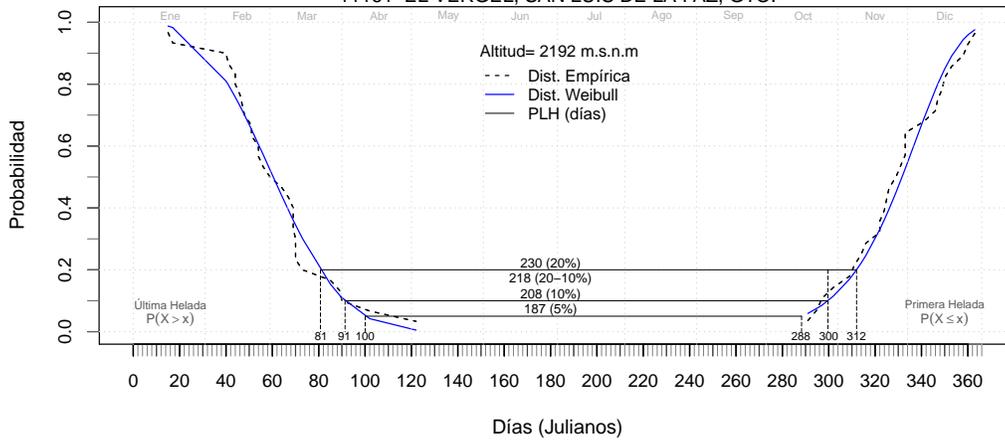
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11160 SAN ISIDRO, OCAMPO, GTO.



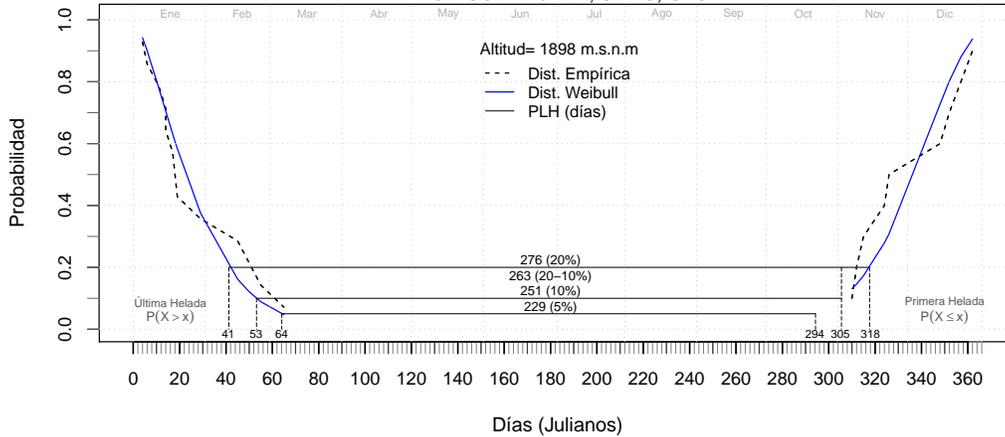
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11161 EL VERGEL, SAN LUIS DE LA PAZ, GTO.



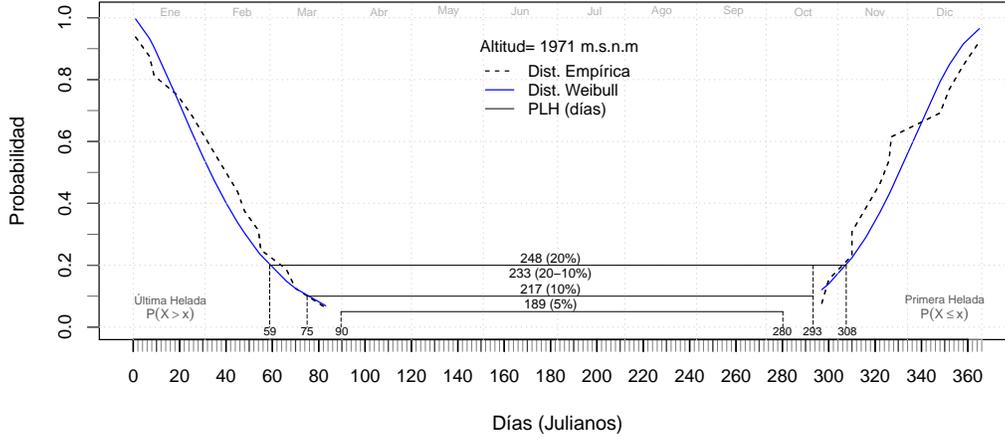
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11162 COMANJILLA, SILAO, GTO.



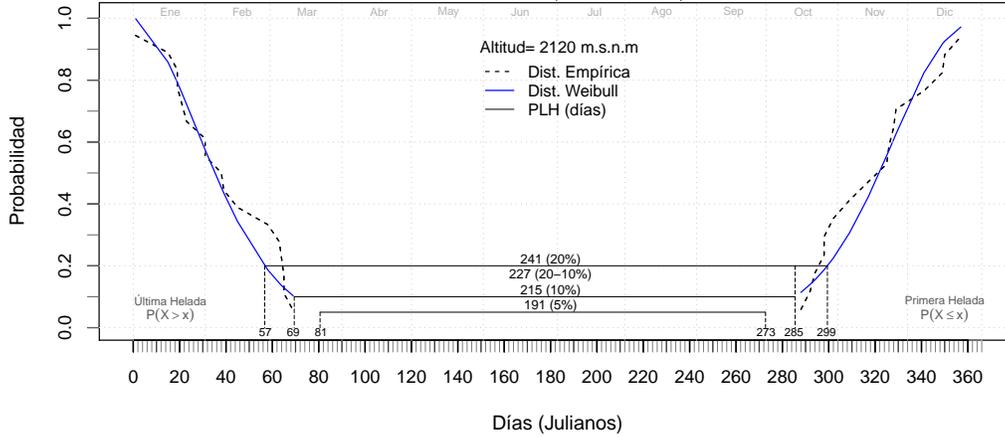
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

11166 EL GIGANTE, JERECUARO, GTO.



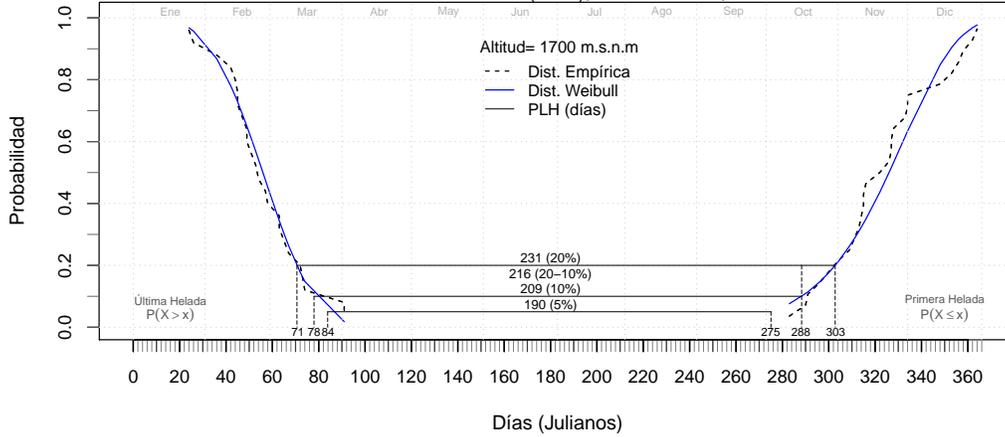
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13012 HUICHAPAN, HUICHAPAN, HGO.



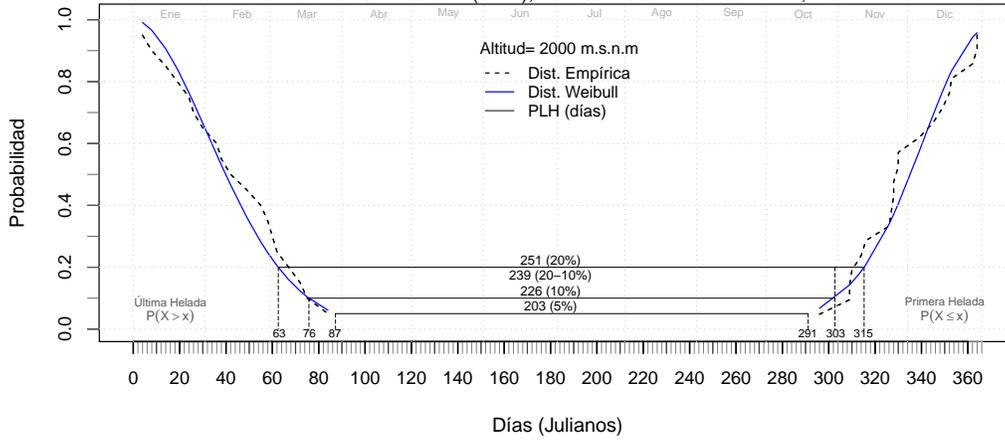
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13013 IXMIQUILPAN (SMN), IXMIQUILPAN, HGO.



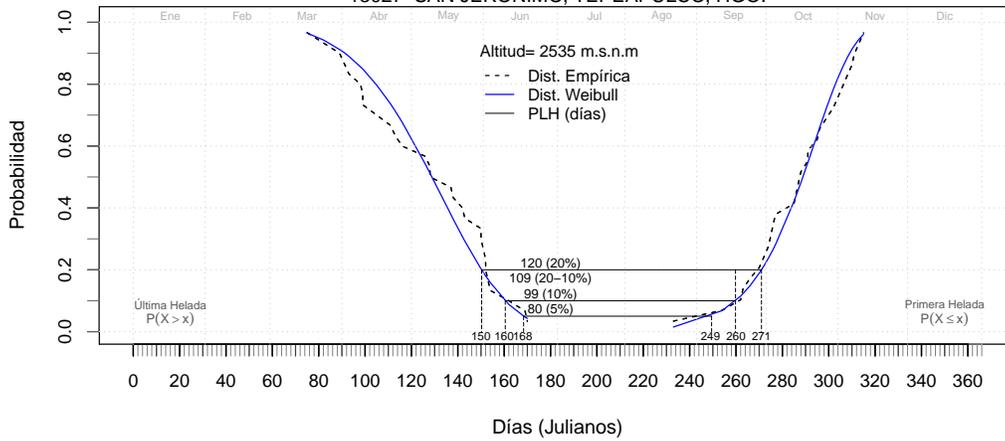
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13018 MIXQUIAHUALA (SMN), MIXQUIAHUALA DE JUAREZ, HGO.



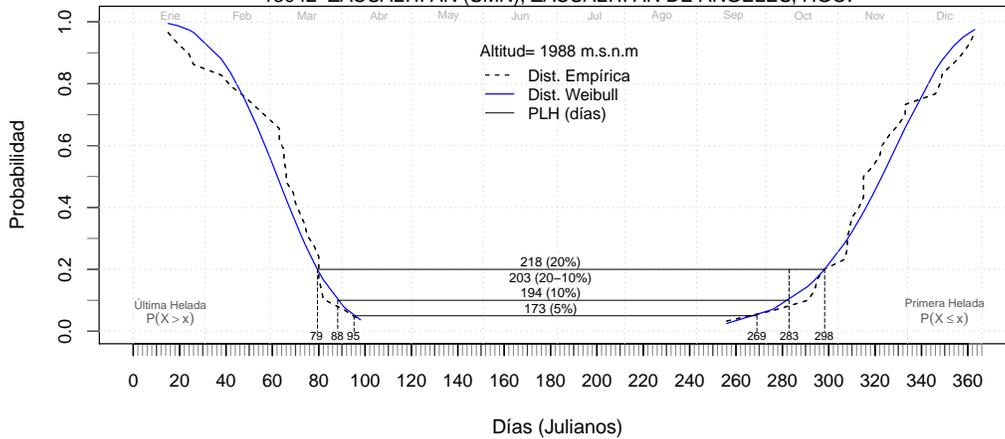
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13027 SAN JERONIMO, TEPEAPULCO, HGO.

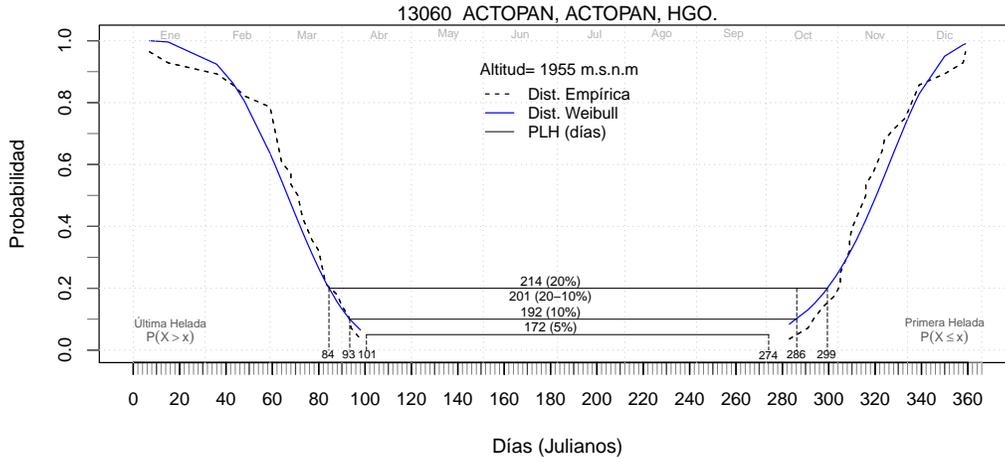


**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

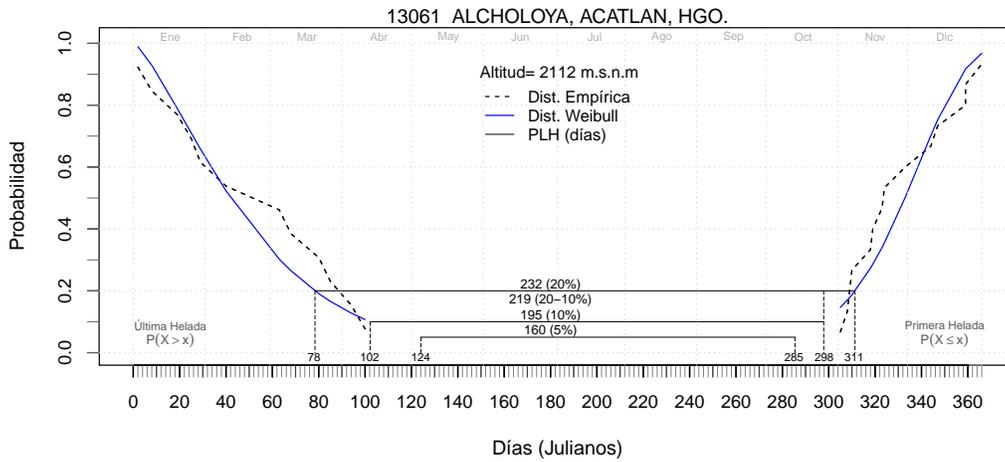
13042 ZACUALTIPAN (SMN), ZACUALTIPAN DE ANGELES, HGO.



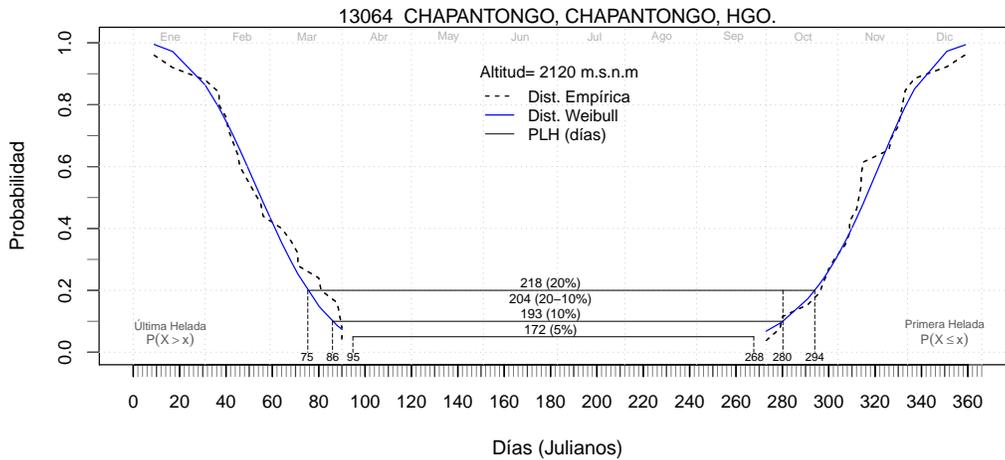
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**



**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

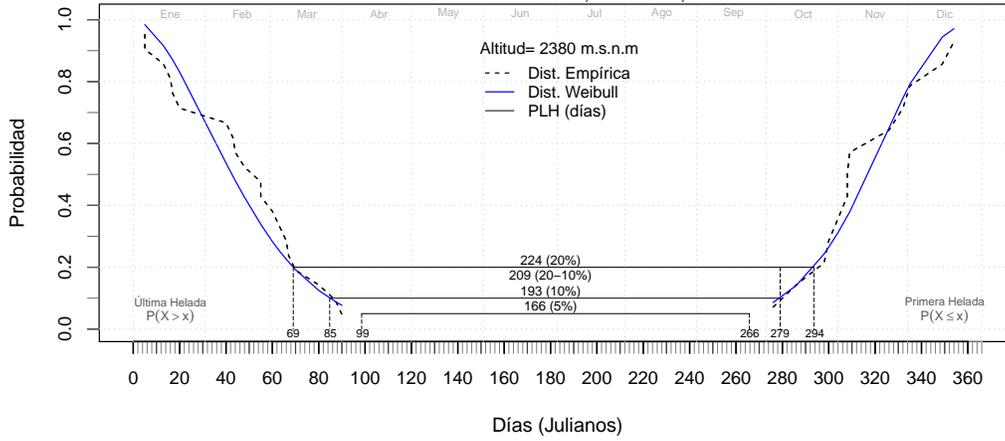


**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**



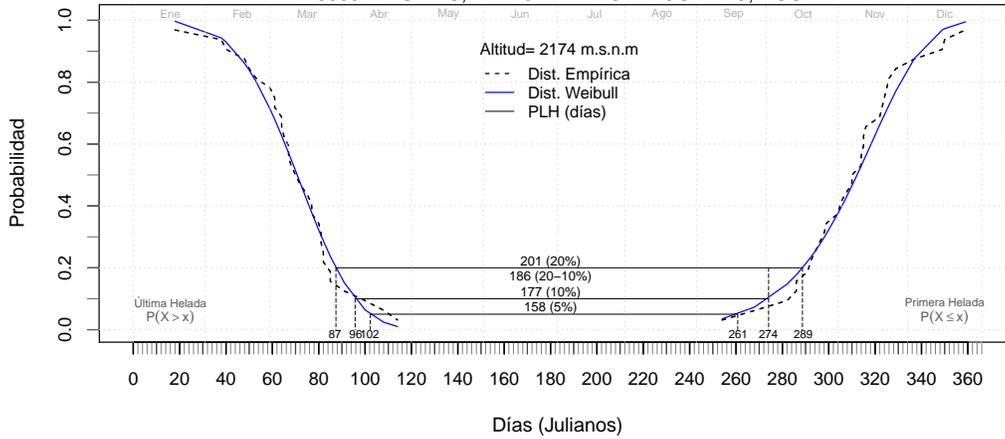
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13065 ENCARNACION, ZIMAPAN, HGO.



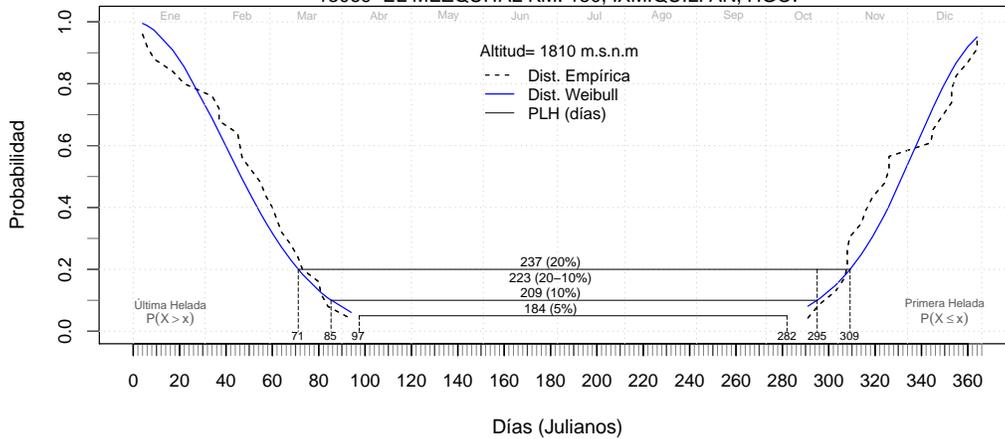
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13068 EL SALTO, TEPEJI DEL RIO DE OCAMPO, HGO.



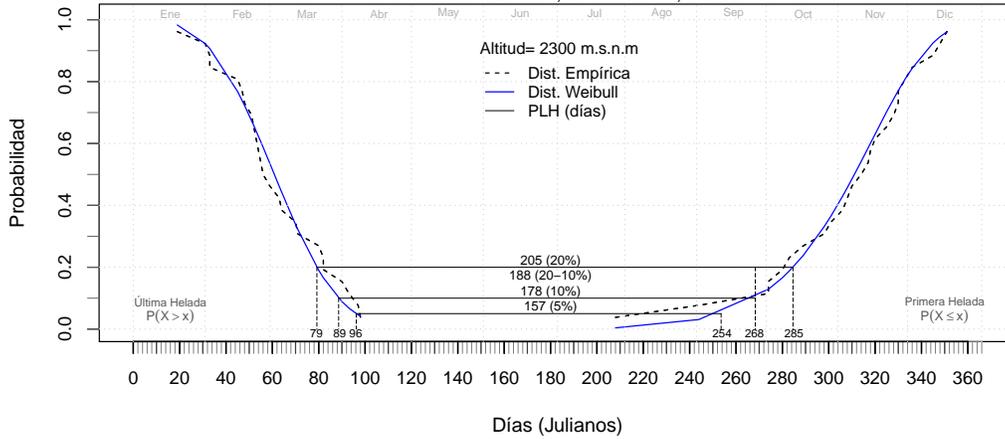
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13069 EL MEZQUITAL KM. 150, IXMIQUILPAN, HGO.



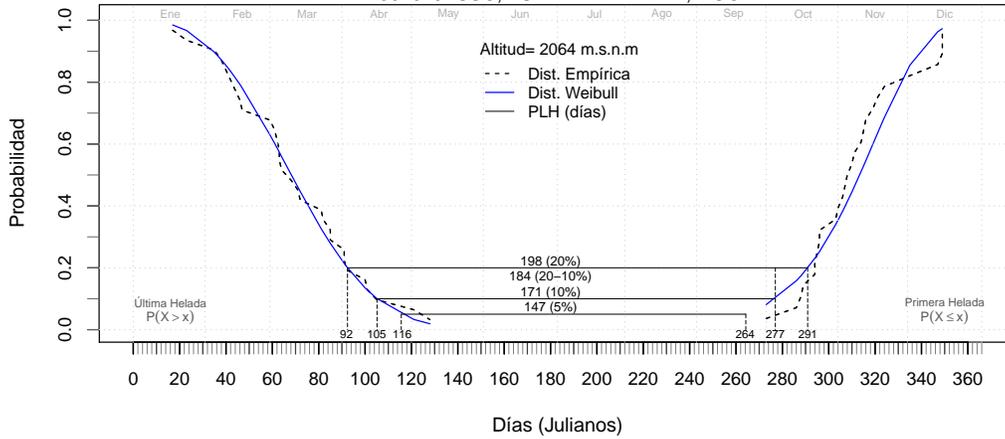
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13070 SANTUARIO, CARDONAL, HGO.



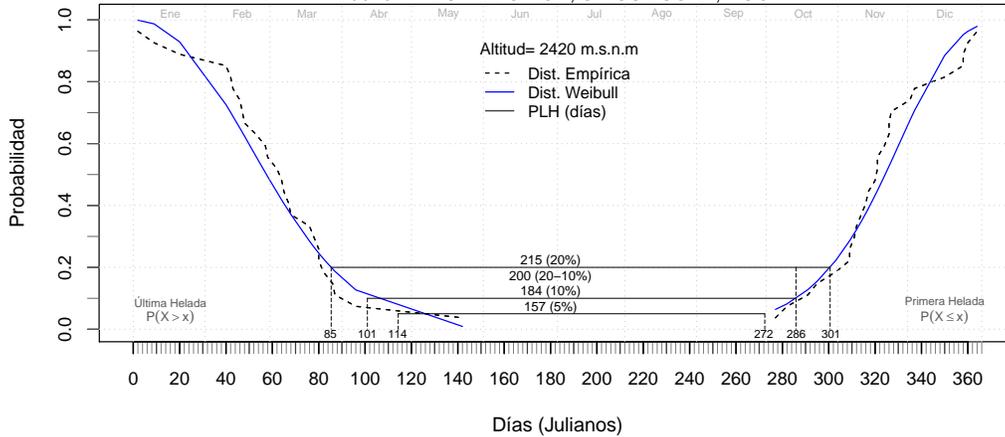
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13075 JASSO, TULA DE ALLENDE, HGO.



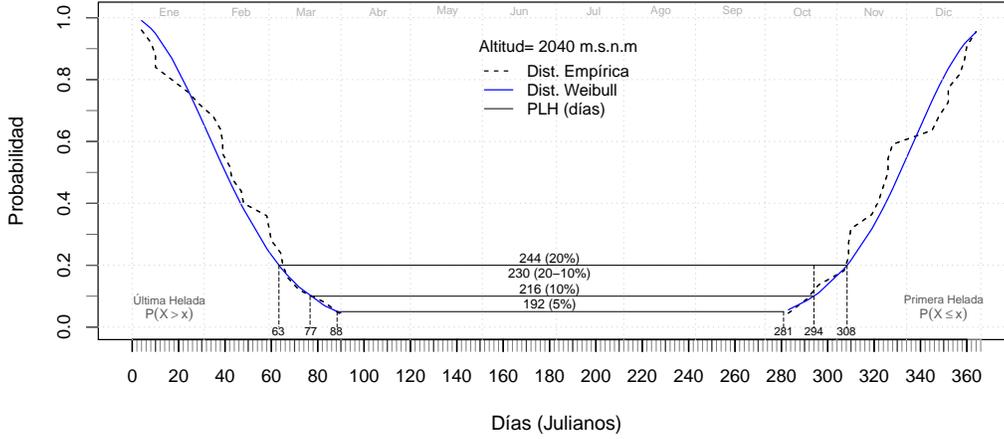
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13079 PRESA EL GIRON, SINGUILUCAN, HGO.



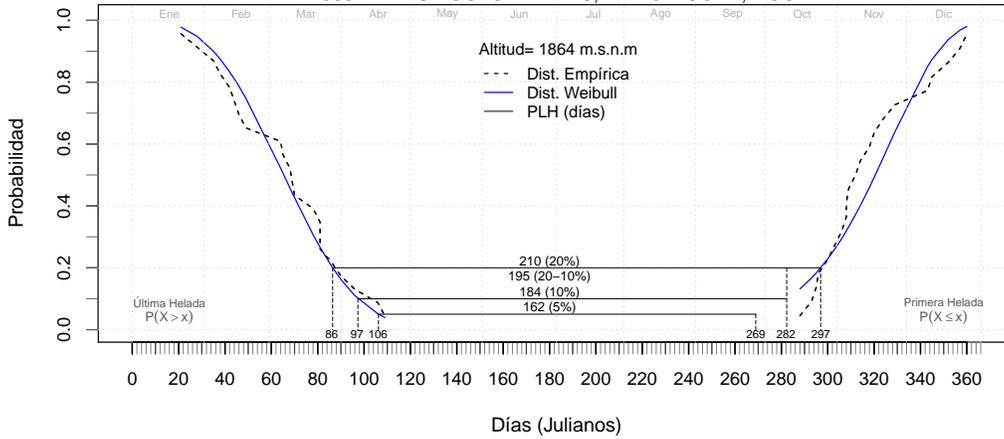
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13080 PRESA ENDHO, TEPETITLAN, HGO.



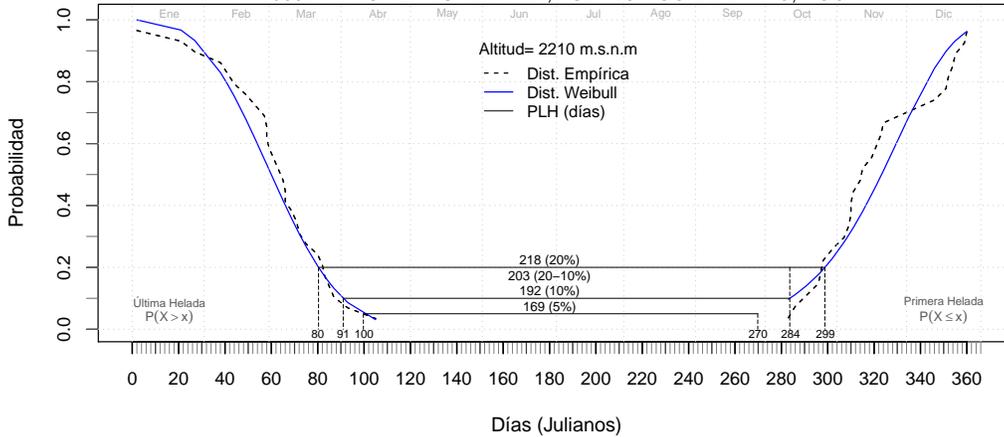
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13081 PRESA GOLONDRINAS, ALFAJAYUCAN, HGO.



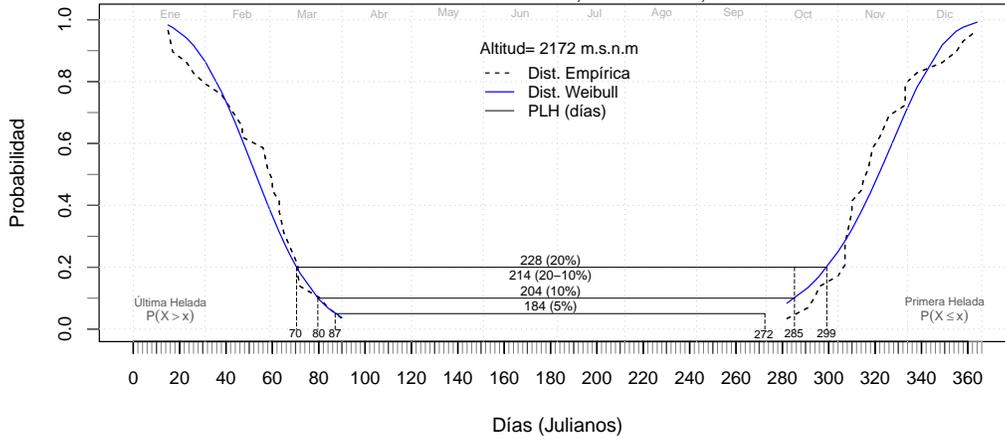
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13082 PRESA LA ESPERANZA, TULANCINGO DE BRAVO, HGO.



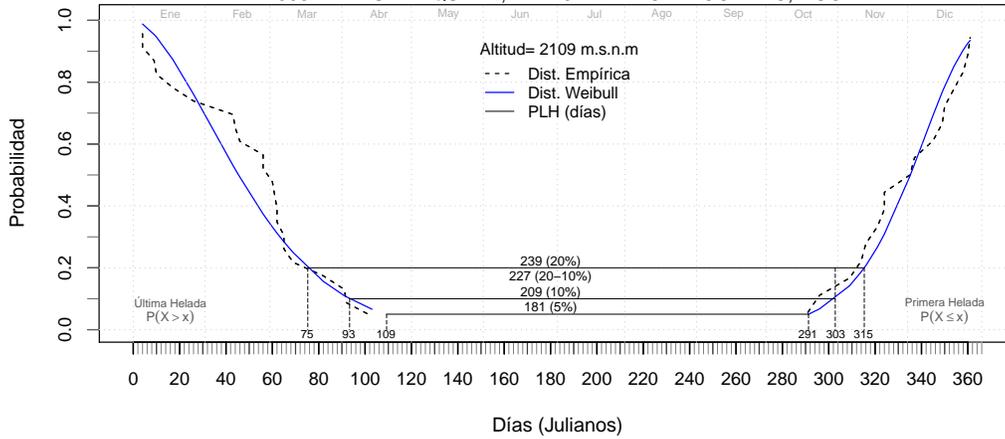
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13083 PRESA MADERO, HUICHAPAN, HGO.



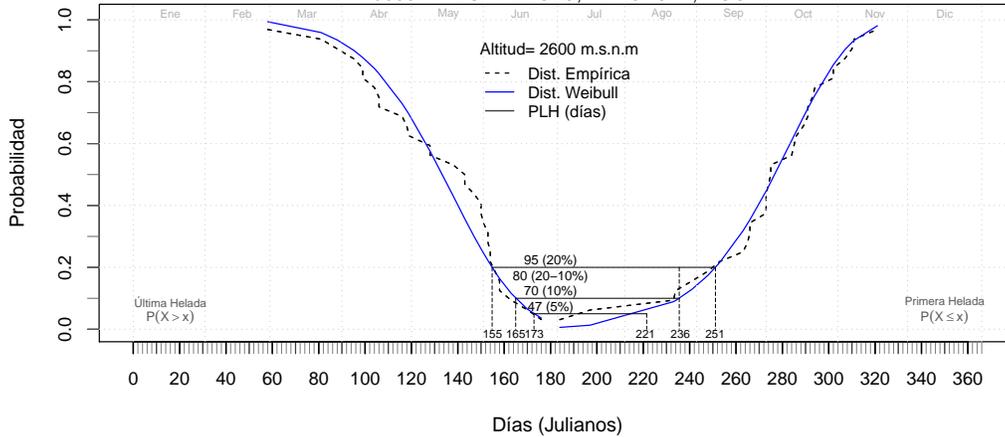
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13084 PRESA REQUENA, TEPEJI DEL RIO DE OCAMPO, HGO.



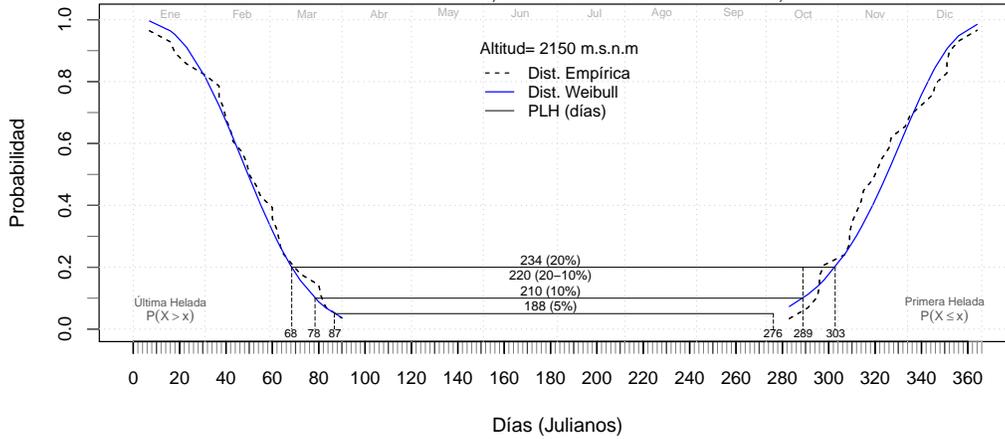
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13085 PRESA TEZOYO, ALMOLOYA, HGO.



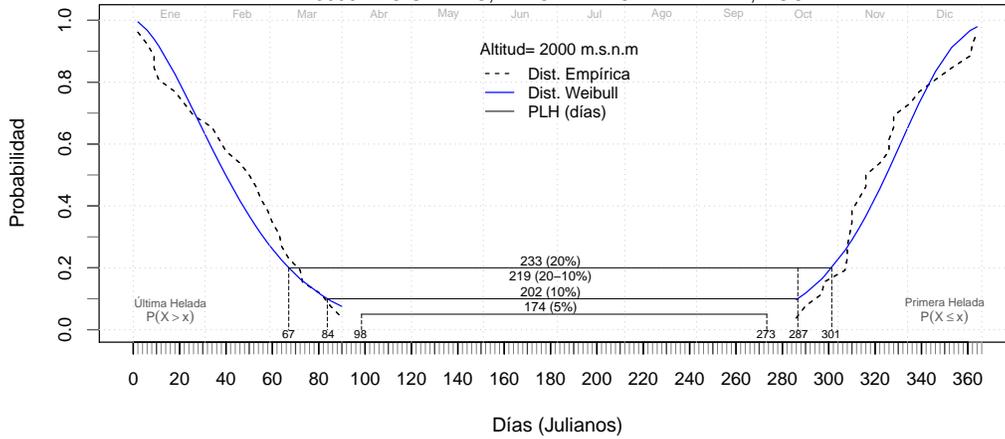
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13089 TEPEJI DEL RIO, TEPEJI DEL RIO DE OCAMPO, HGO.



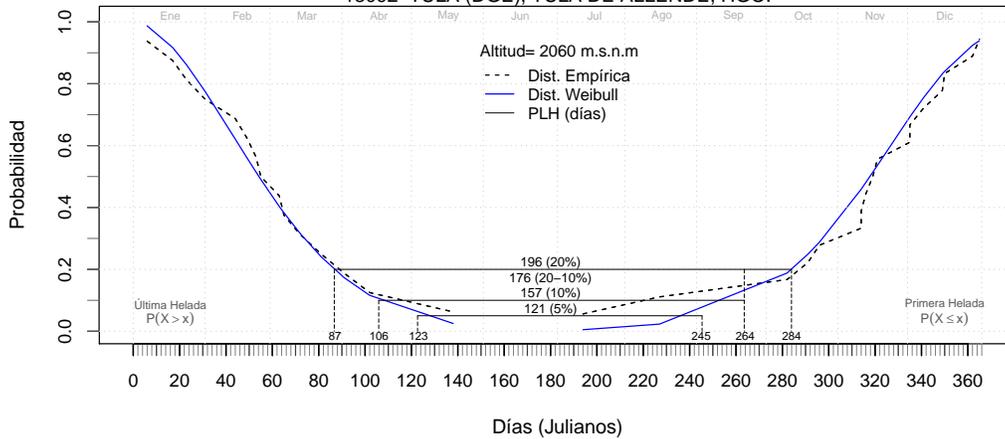
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13090 RIO SALADO, TEZONTEPEC DE ALDAMA, HGO.



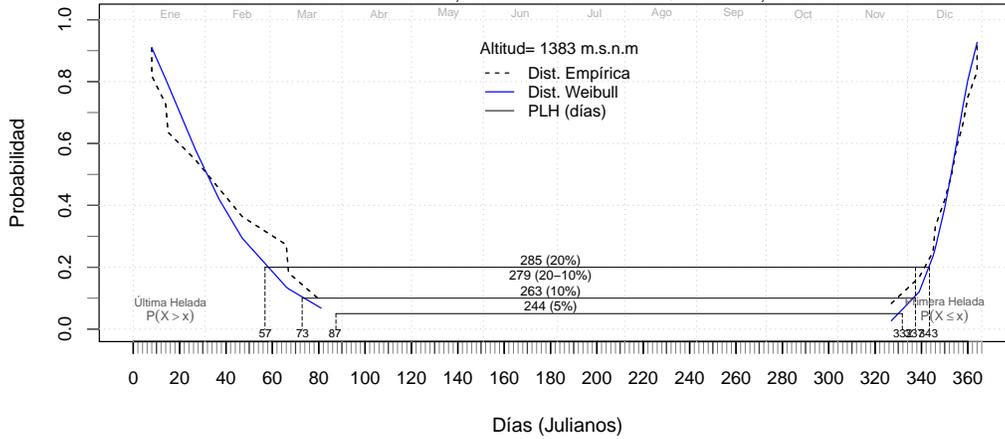
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13092 TULA (DGE), TULA DE ALLENDE, HGO.



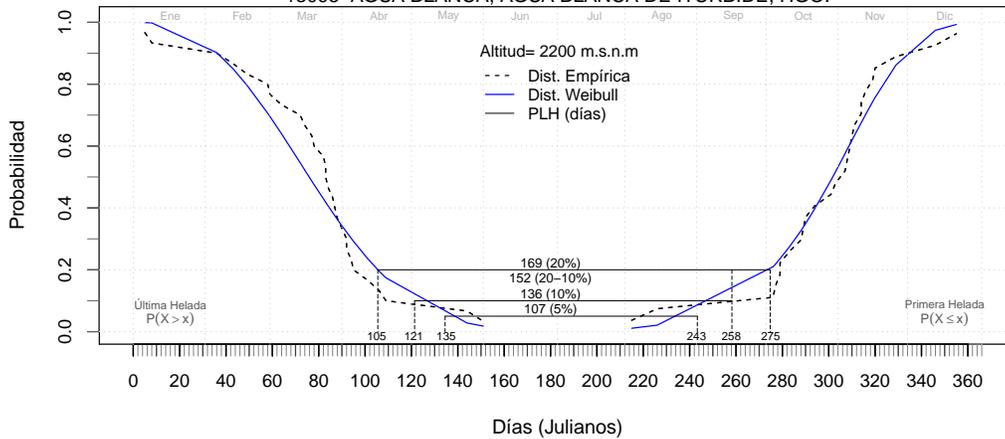
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13093 VENADOS, SAN AGUSTIN METZQUITILAN, HGO.



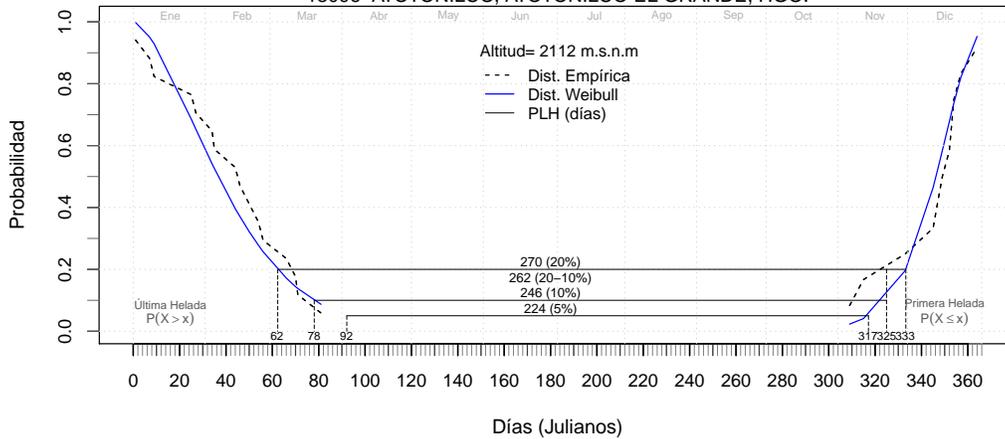
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13095 AGUA BLANCA, AGUA BLANCA DE ITURBIDE, HGO.



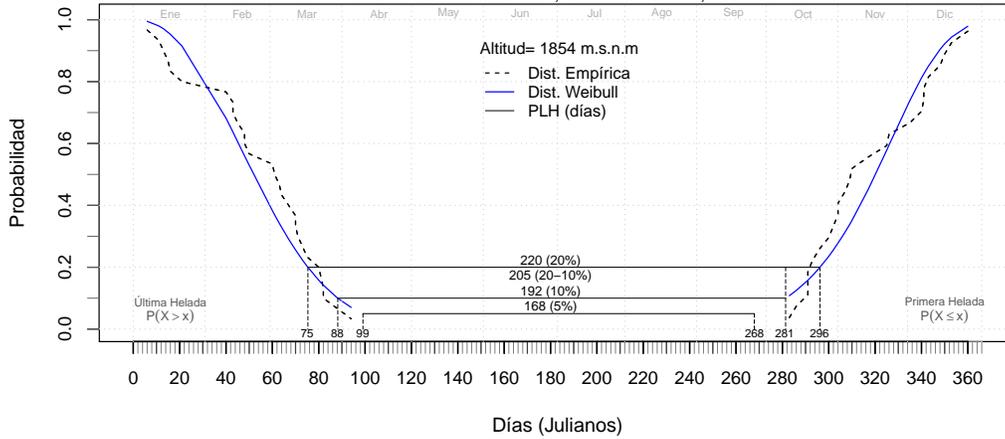
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13096 ATOTONILCO, ATOTONILCO EL GRANDE, HGO.



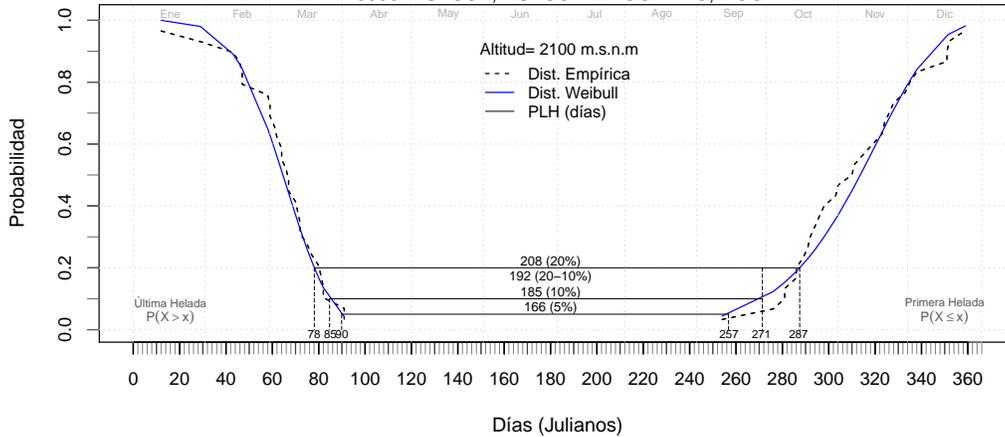
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13097 CHILCUAUTLA, CHILCUAUTLA, HGO.



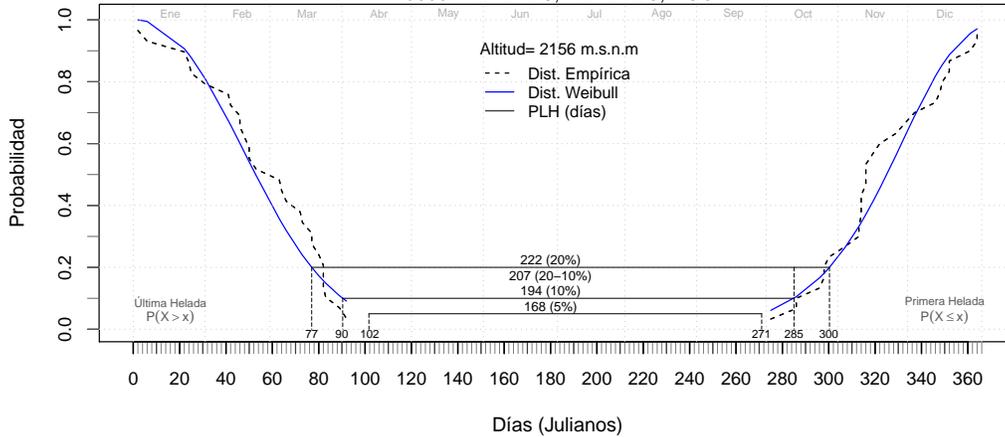
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13098 HUASCA, HUASCA DE OCAMPO, HGO.



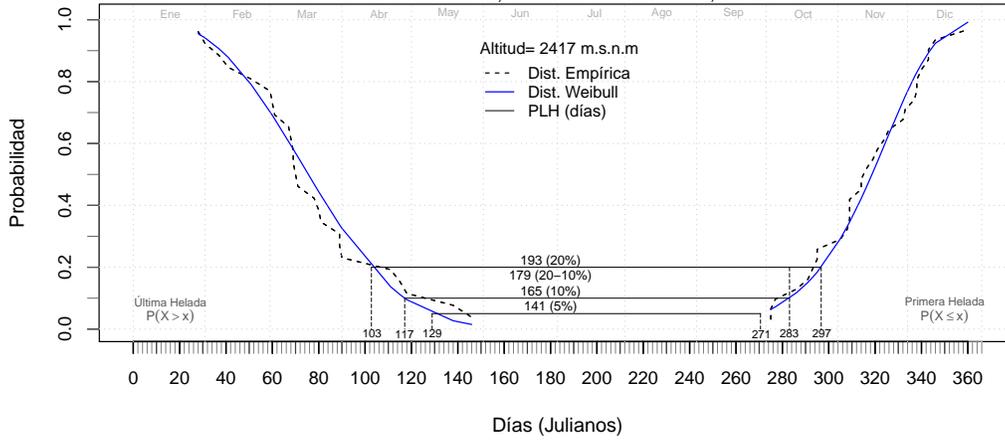
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13099 METEPEC, METEPEC, HGO.



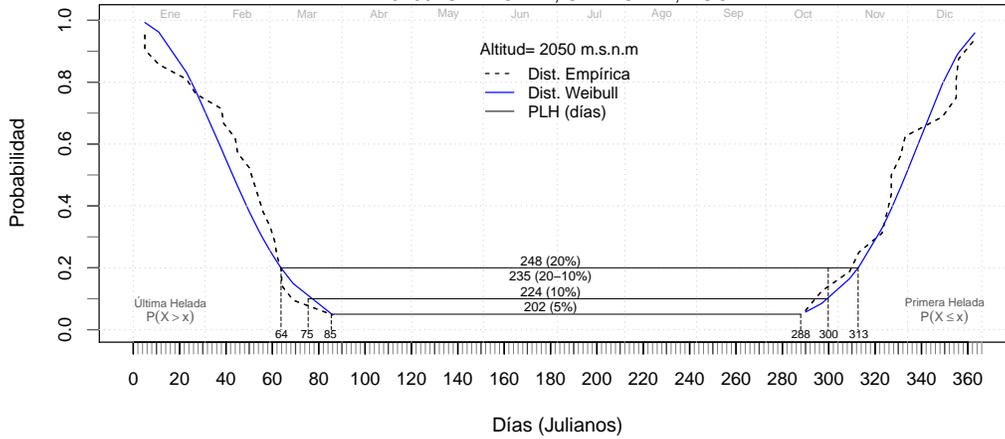
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13100 OMITLAN, OMITLAN DE JUAREZ, HGO.



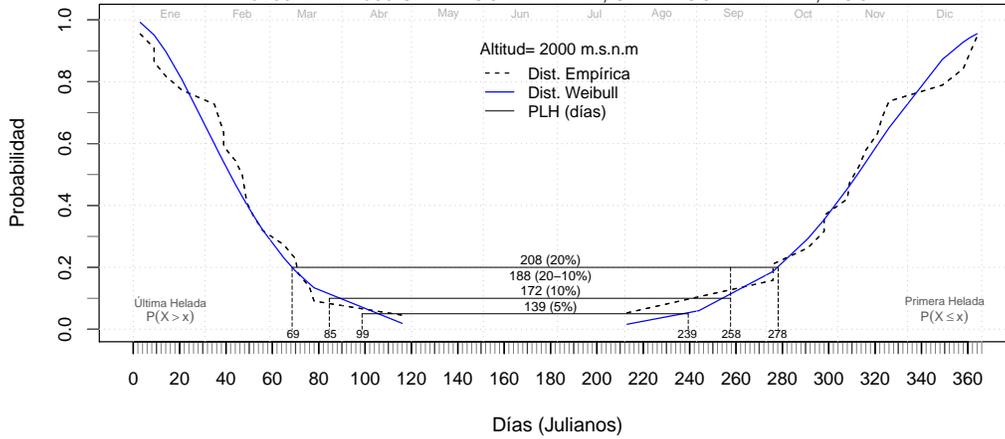
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13105 CARDONAL, CARDONAL, HGO.



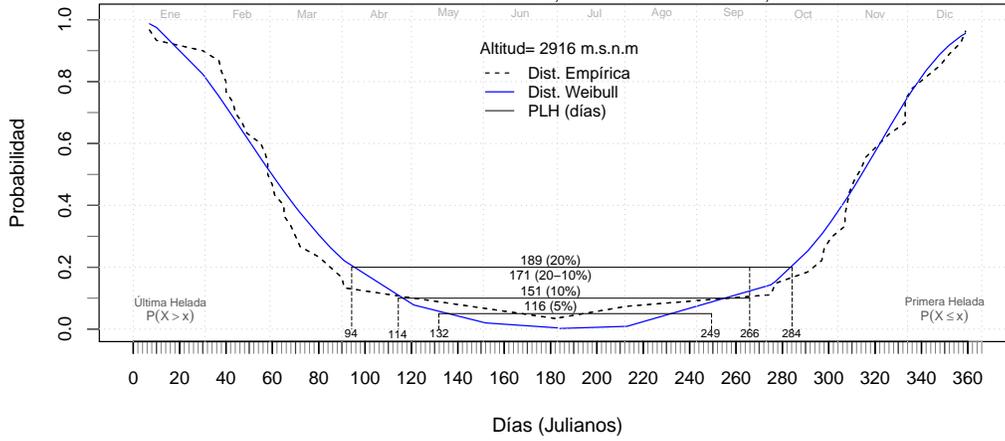
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13109 E.T.A. 385 SANTIAGO DE ANAYA, SANTIAGO DE ANAYA, HGO.



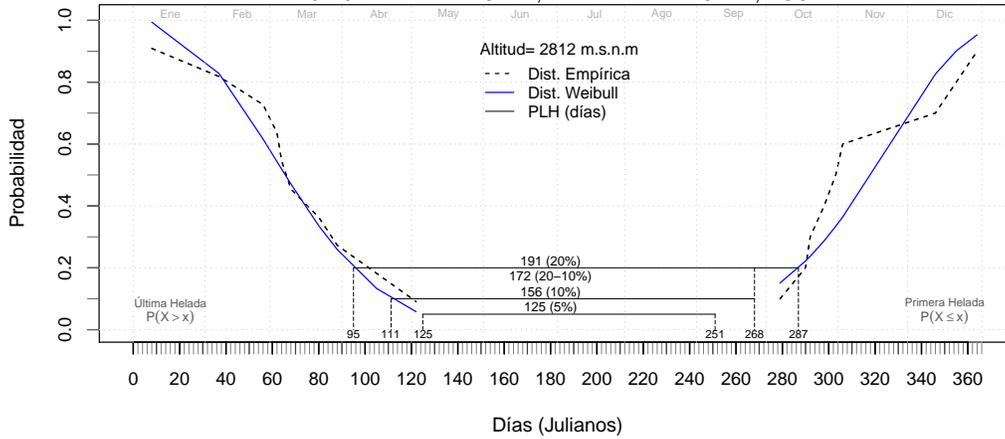
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13112 MINERAL DEL CHICO, MINERAL DEL CHICO, HGO.



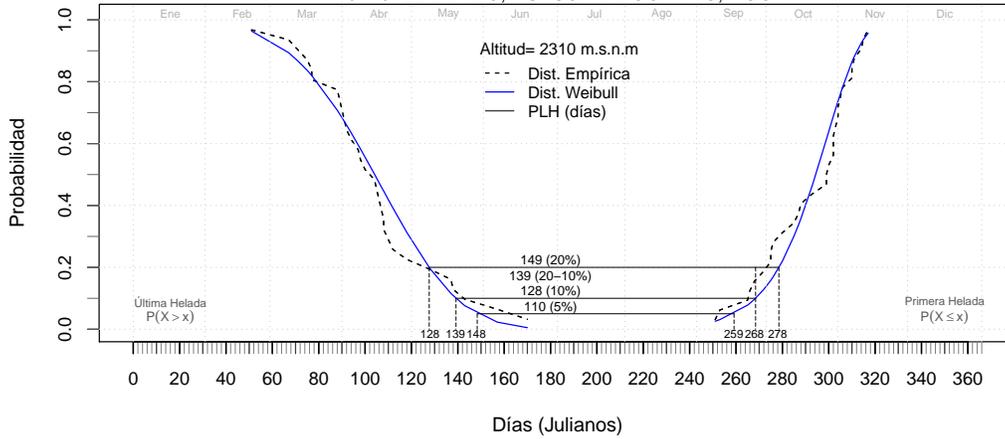
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13115 REAL DEL MONTE, MINERAL DEL MONTE, HGO.



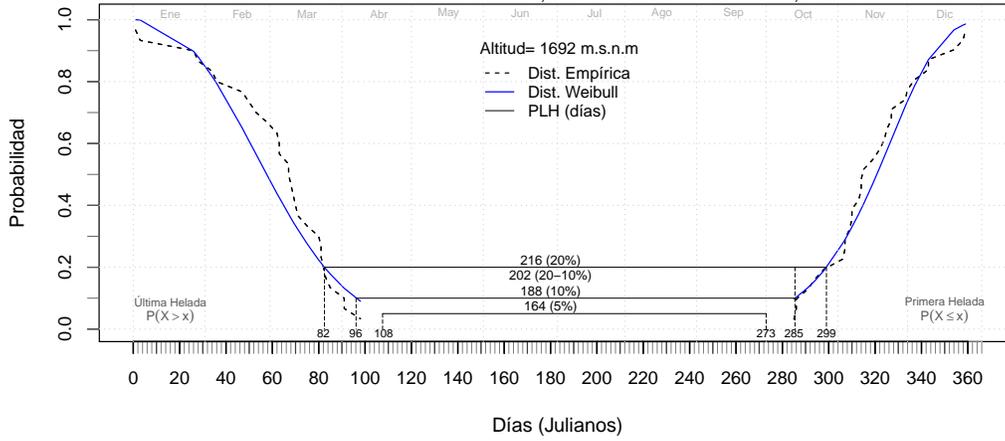
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13116 EL ZEMBO, HUASCA DE OCAMPO, HGO.



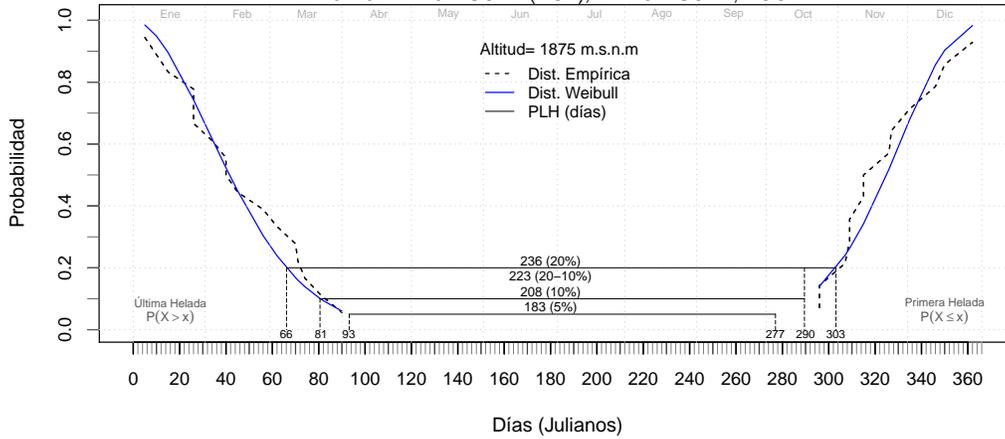
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13121 SANTA MARIA AMAJAC, ATOTONILCO EL GRANDE, HGO.



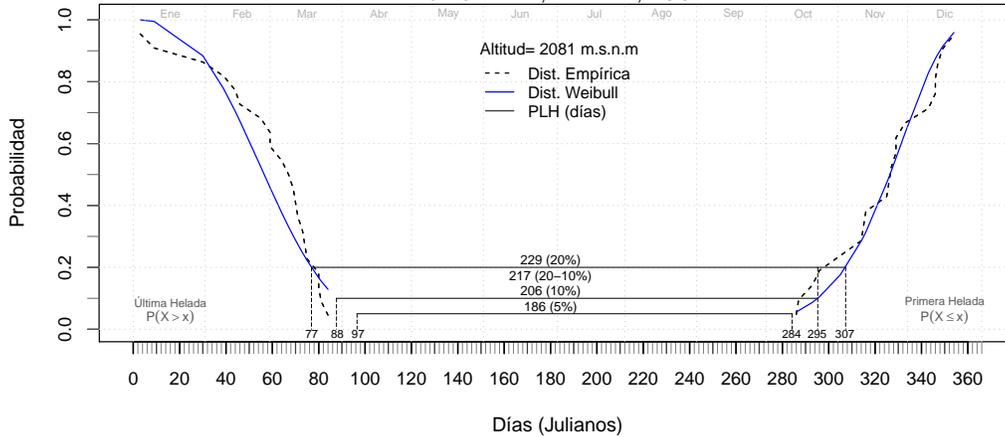
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13125 ALFAJAYUCAN (DGE), ALFAJAYUCAN, HGO.



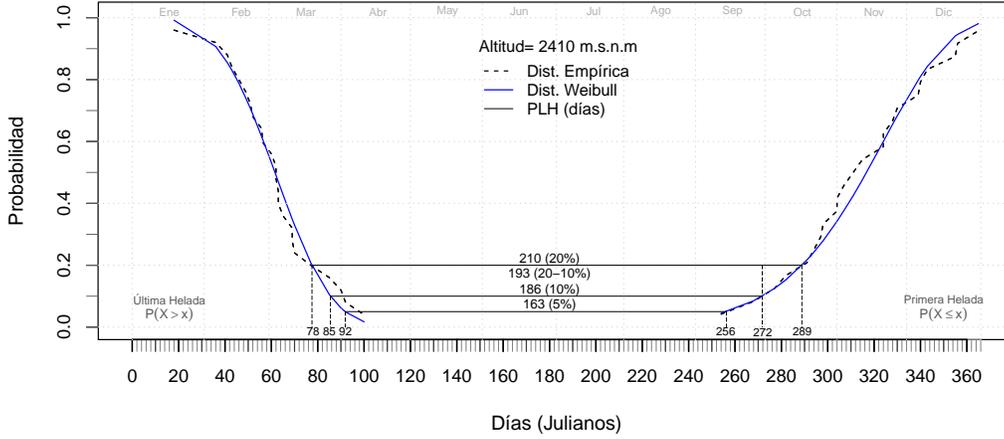
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13148 XITHA, ZIMAPAN, HGO.



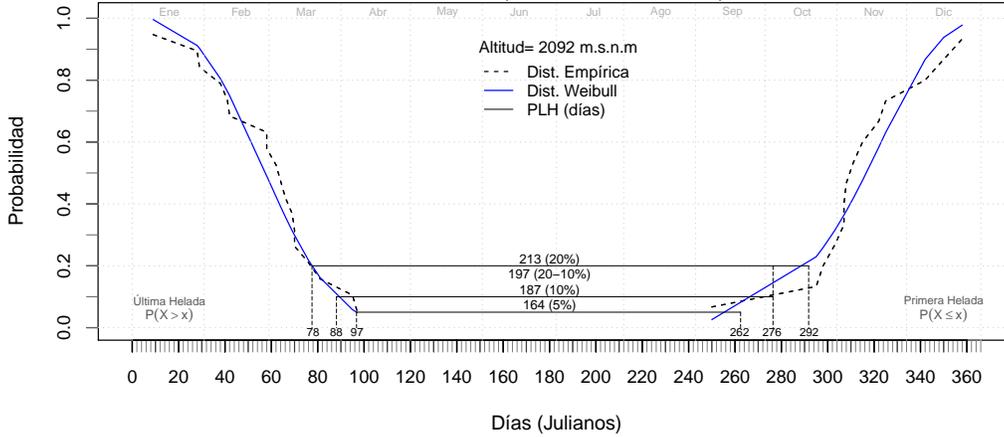
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13149 EL BANCO, TEPEJI DEL RIO DE OCAMPO, HGO.



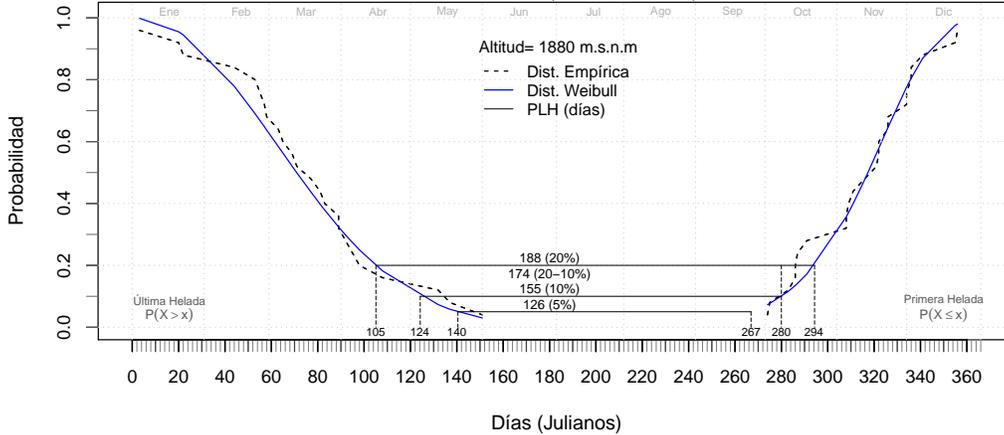
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13151 EL ENCINO, SANTIAGO DE ANAYA, HGO.



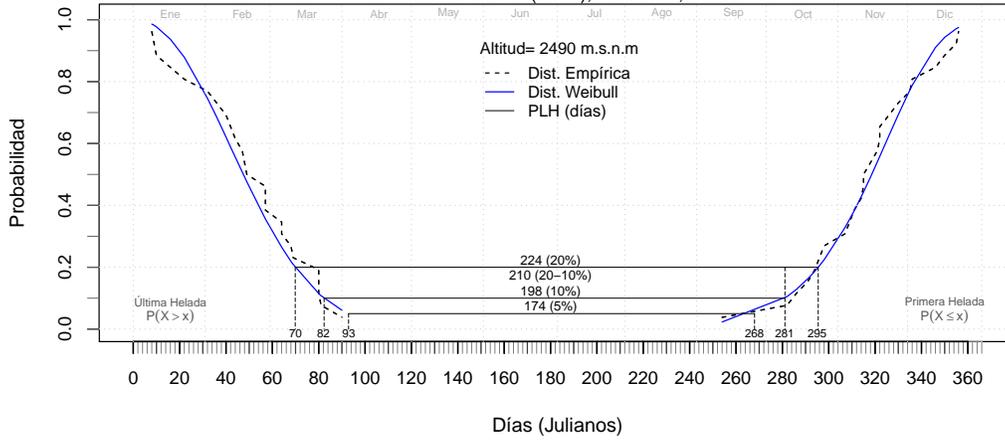
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

13152 EL POTRERO, TECOZAUTLA, HGO.



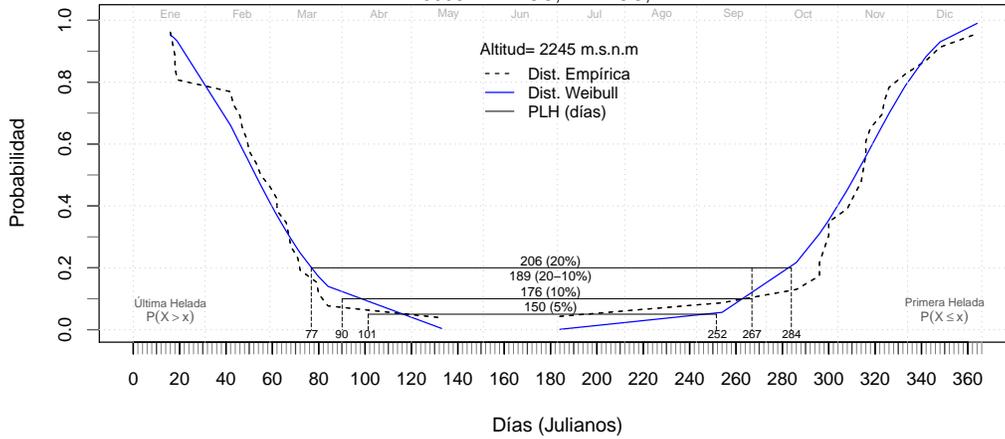
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15002 ACULCO (SMN), ACULCO, MEX.



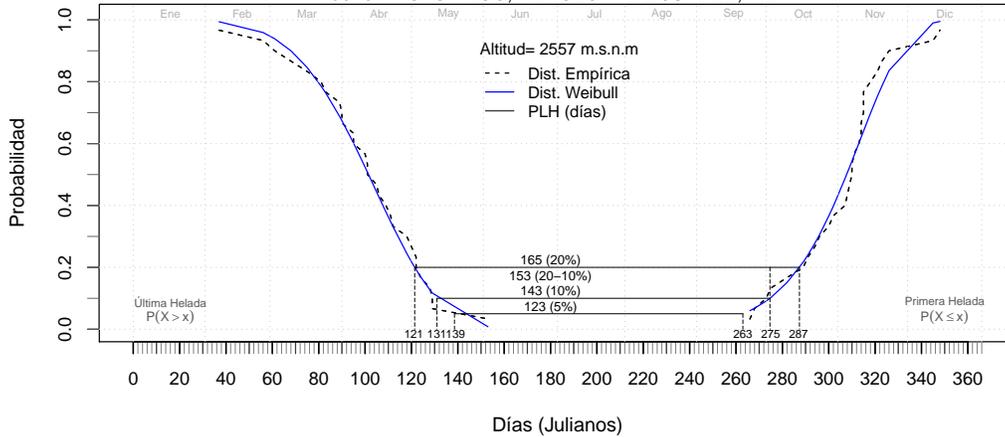
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15008 ATENCO, ATENCO, MEX.



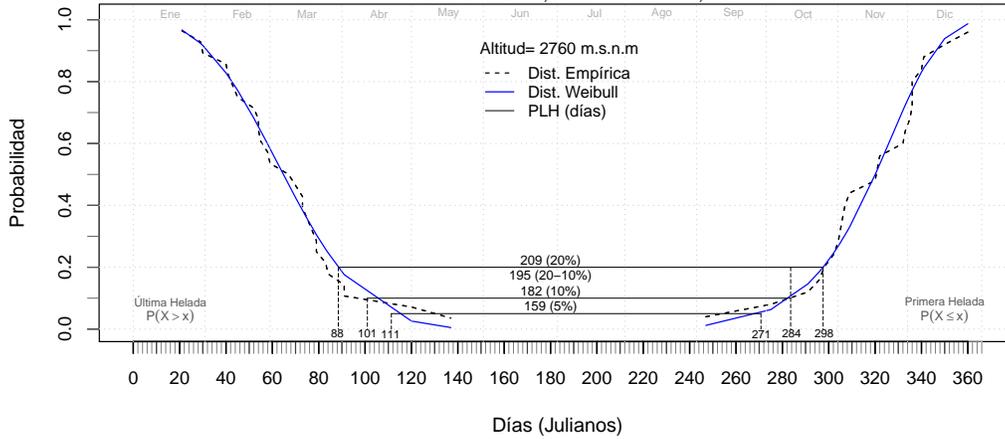
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15010 ATOTONILCO, ALMOLOYA DE JUAREZ, MEX.



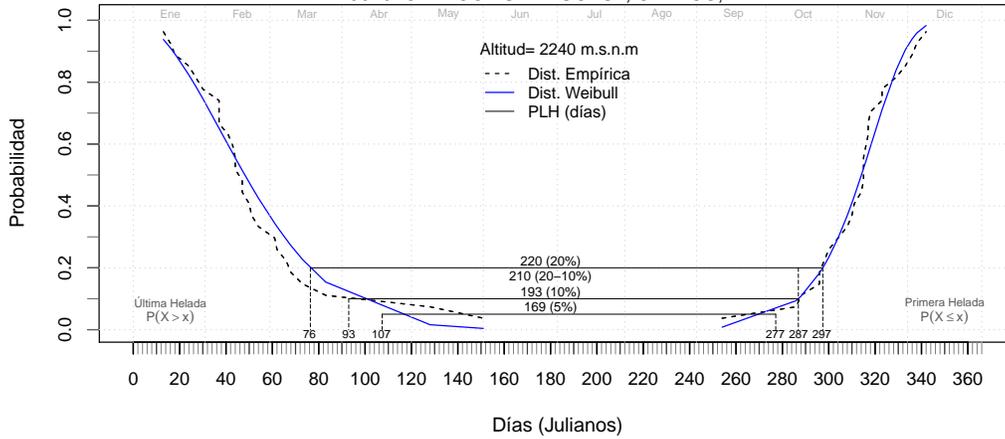
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15014 CAPULHUAC, OTZOLOTEPEC, MEX.



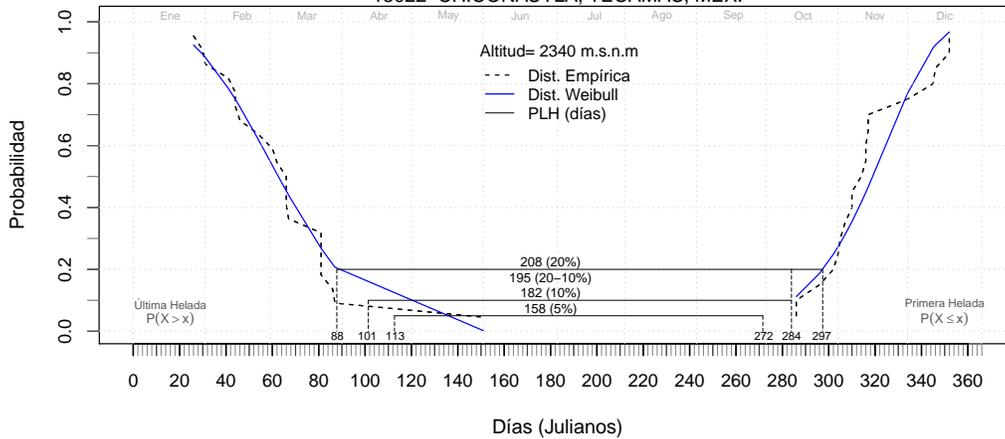
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15020 CHALCO –SAN LUCAS–, CHALCO, MEX.



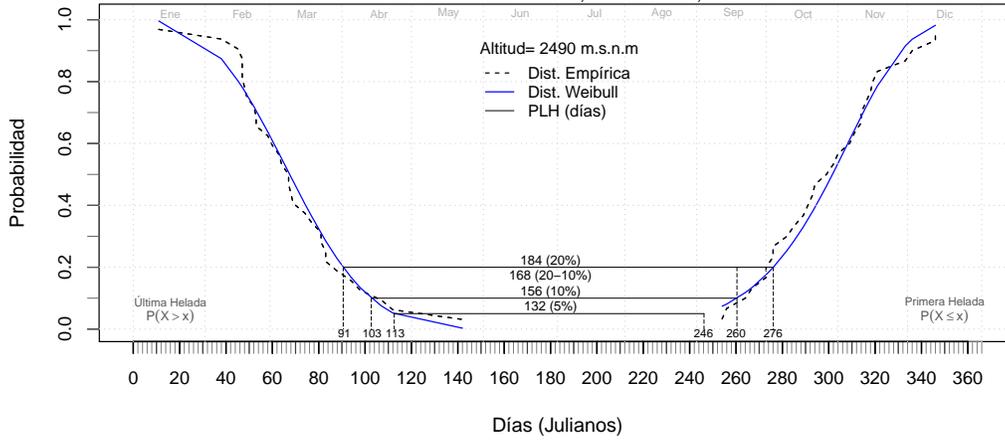
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15022 CHICONAUTLA, TECAMAC, MEX.



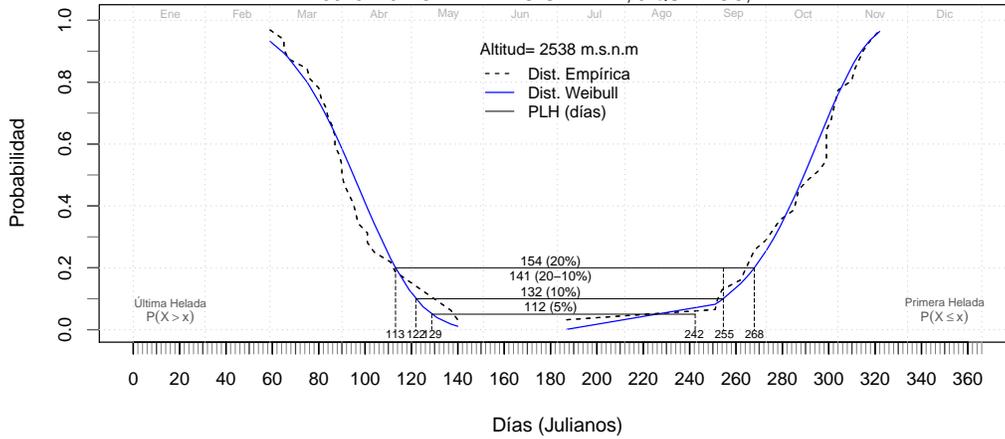
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15024 PRESA DANXHO, JILOTEPEC, MEX.



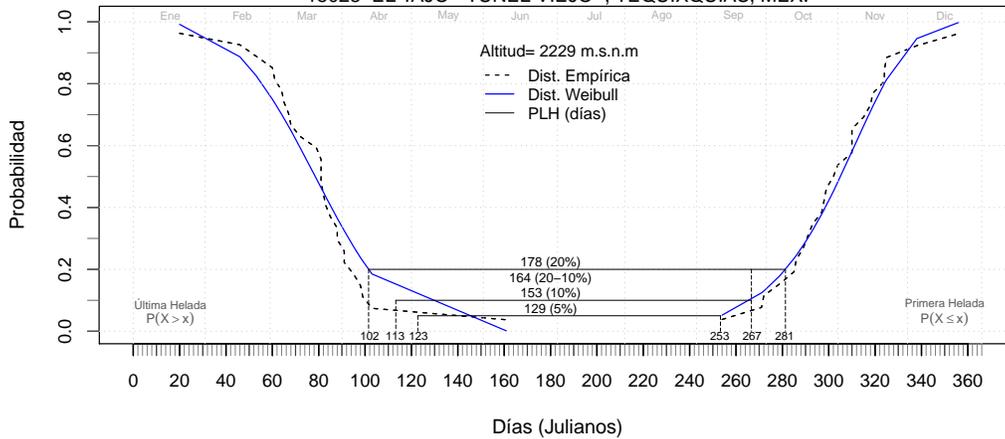
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15025 EJIDO DE LLANO GRANDE, JIQUIPILCO, MEX.



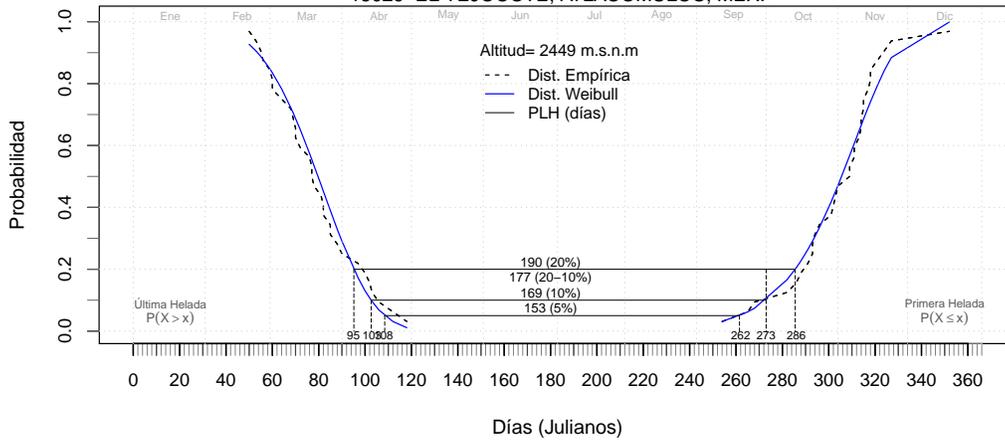
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15028 EL TAJO -TUNEL VIEJO-, TEQUIXQUIAC, MEX.



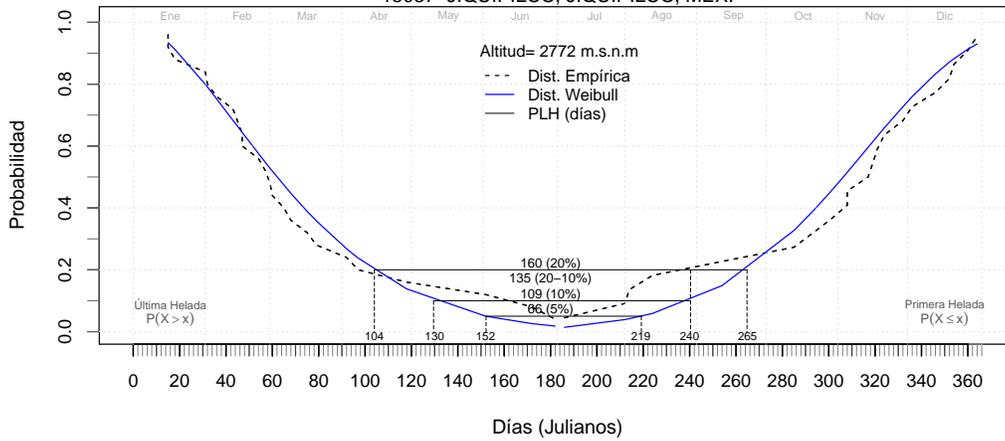
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15029 EL TEJOCOTE, ATLACOMULCO, MEX.



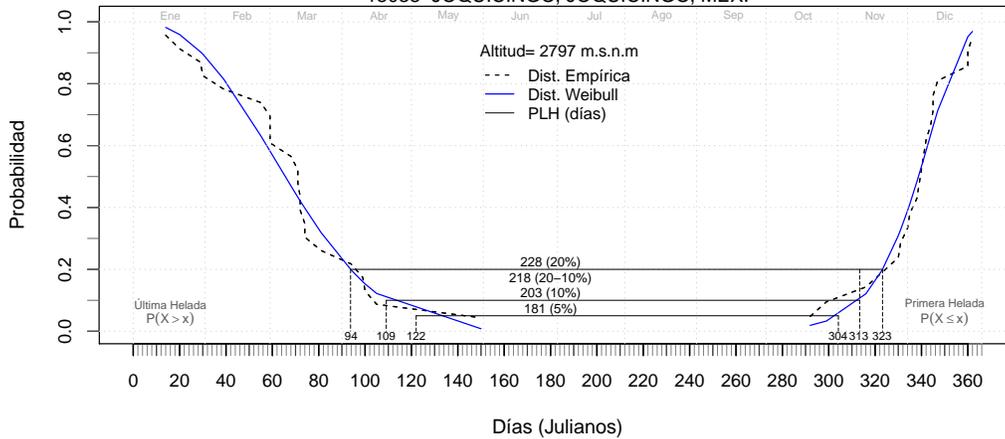
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15037 JIQUIPILCO, JIQUIPILCO, MEX.



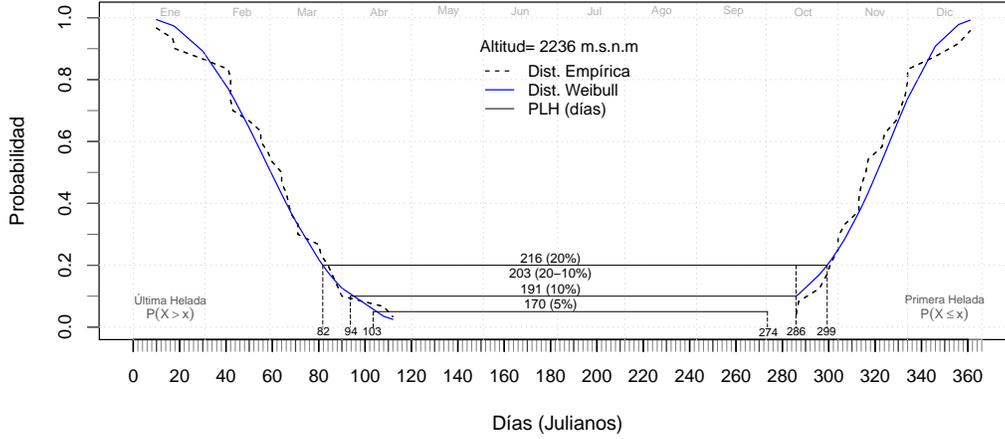
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15038 JOQUICINGO, JOQUICINGO, MEX.



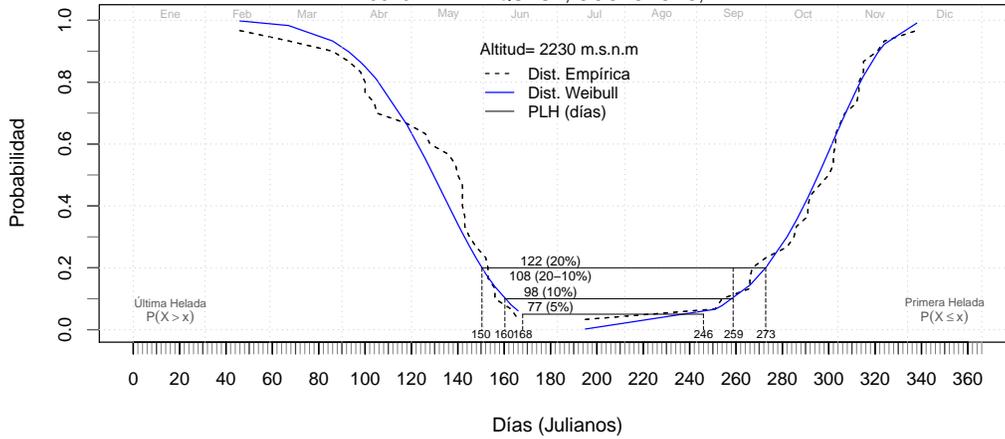
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15041 GRAN CANAL KM 27+250, ECATEPEC DE MORELOS, MEX.



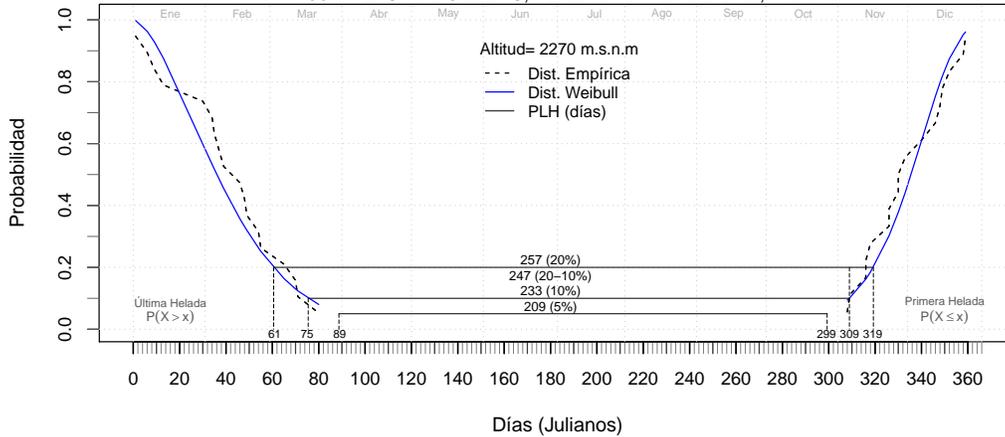
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15045 LA MARQUESA, OCOYOACAC, MEX.



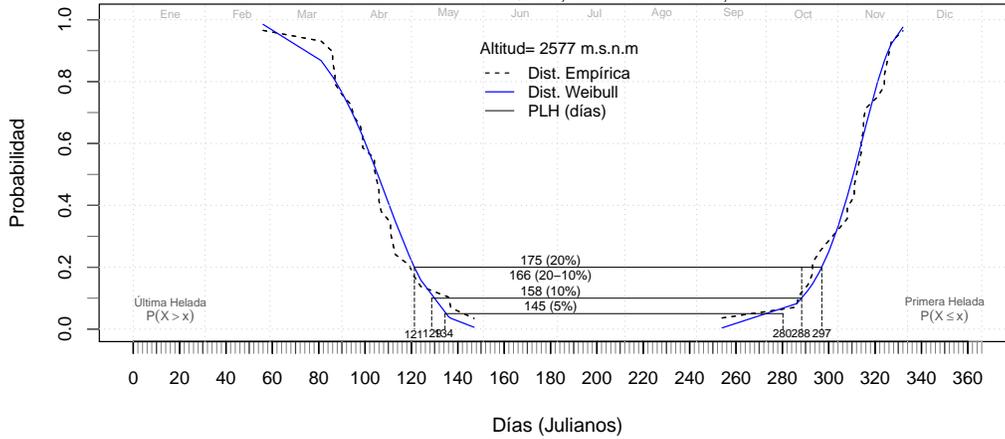
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15047 LAS ARBOLEDAS, TLALNEPANTLA DE BAZ, MEX.



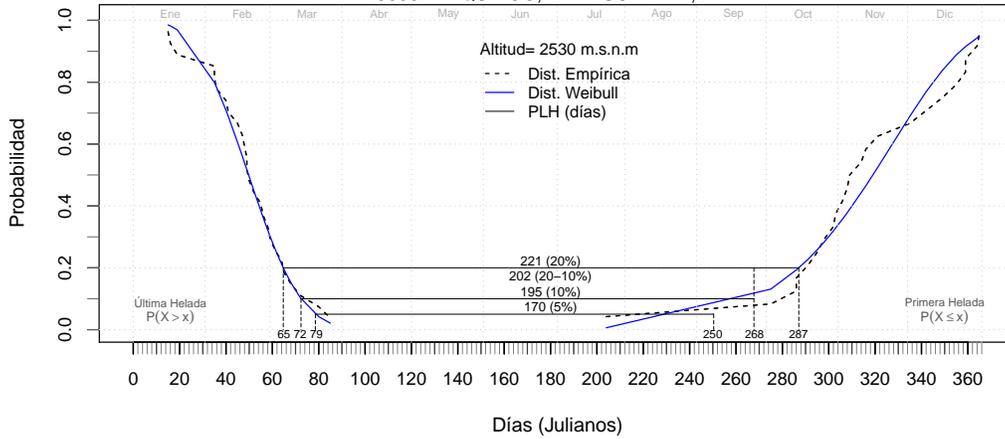
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15051 LOS VELAZQUEZ, VILLA VICTORIA, MEX.



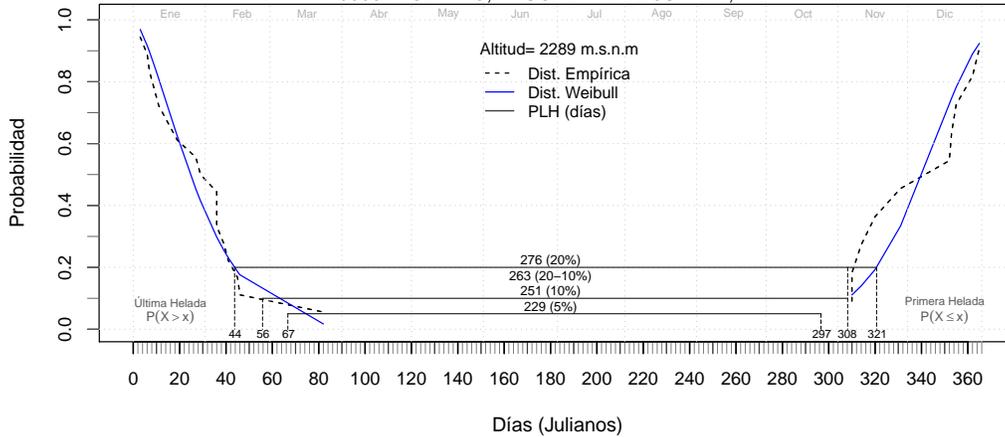
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15055 MAQUIXCO, TEMASCALAPA, MEX.



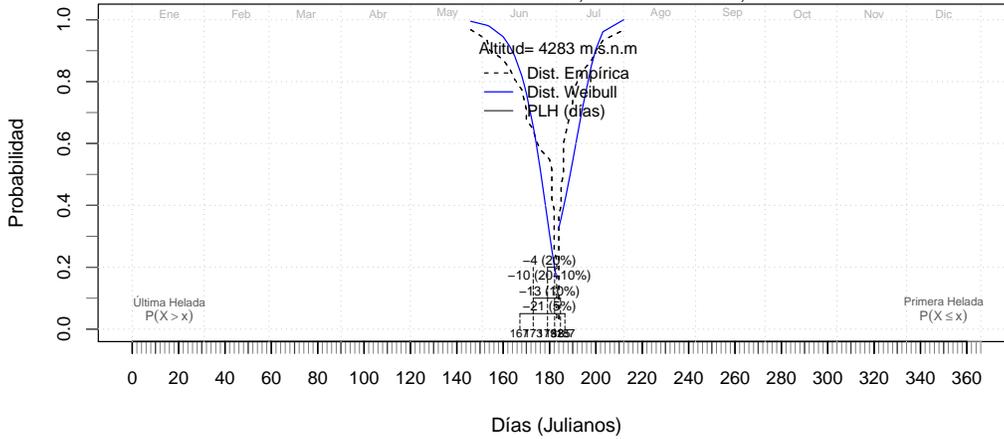
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15058 MOLINITO, NAUCALPAN DE JUAREZ, MEX.



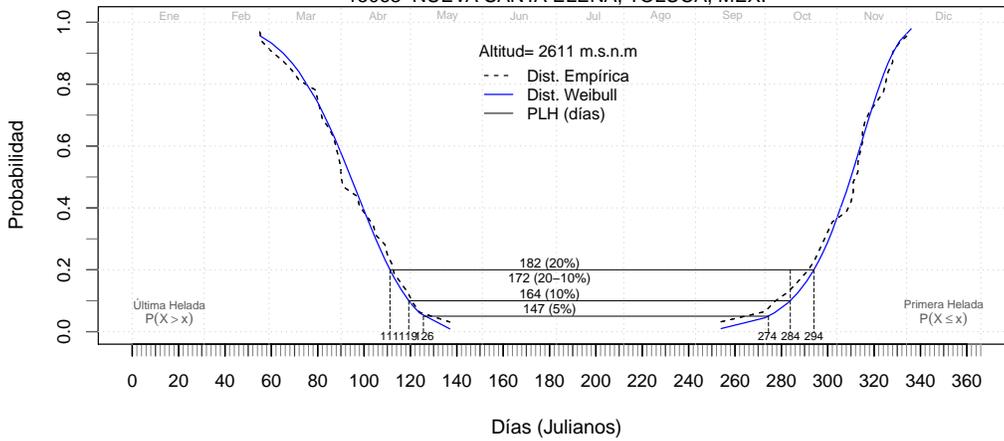
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15062 NEVADO DE TOLUCA, ZINACANTEPEC, MEX.



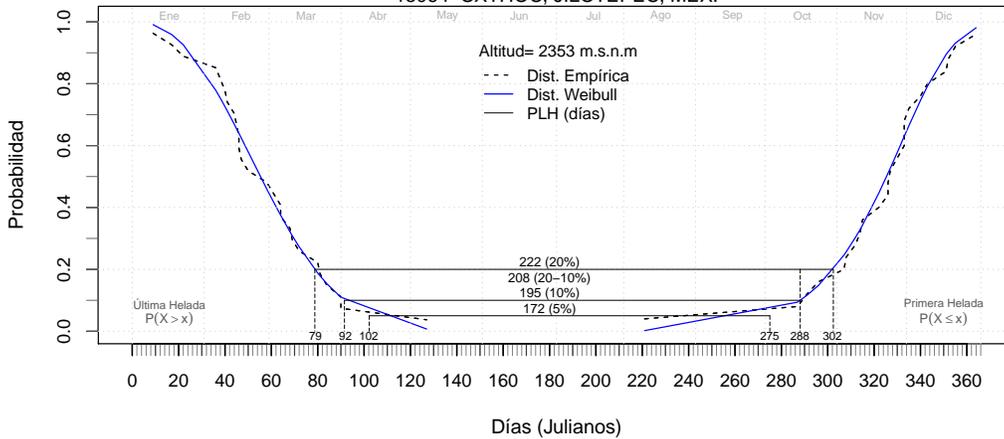
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15063 NUEVA SANTA ELENA, TOLUCA, MEX.



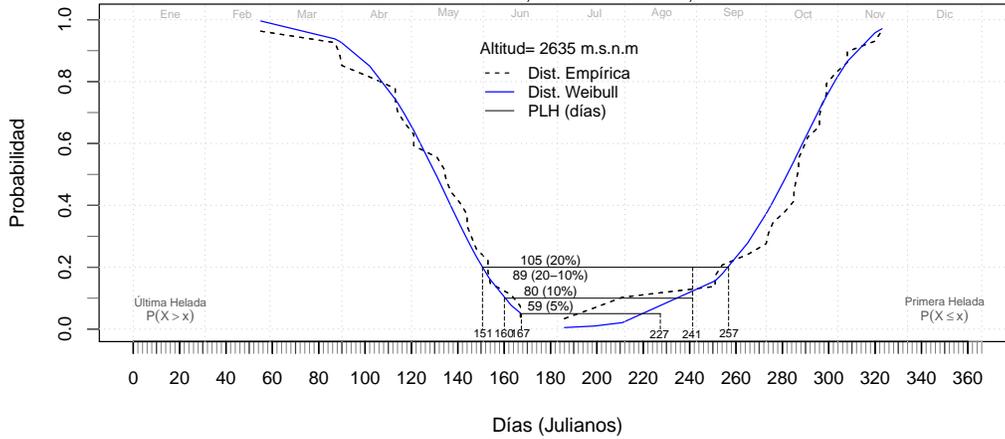
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15064 OXTHOC, JILOTEPEC, MEX.



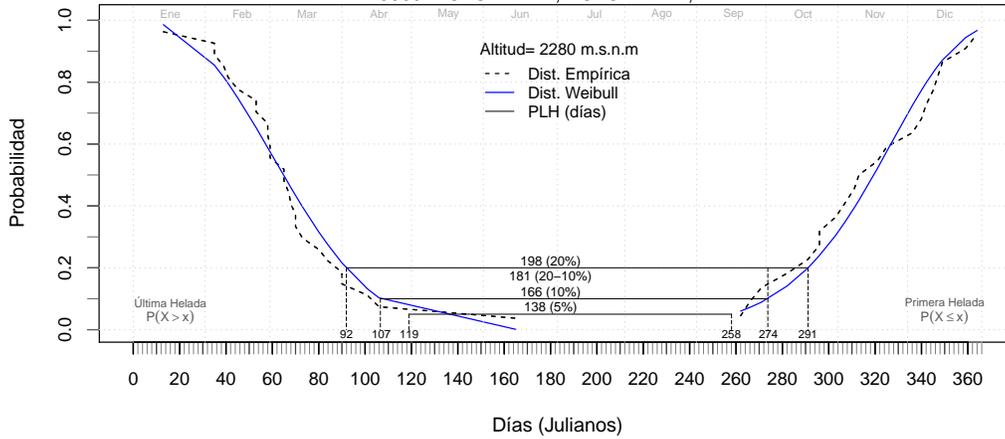
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15066 PALIZADA, VILLA VICTORIA, MEX.



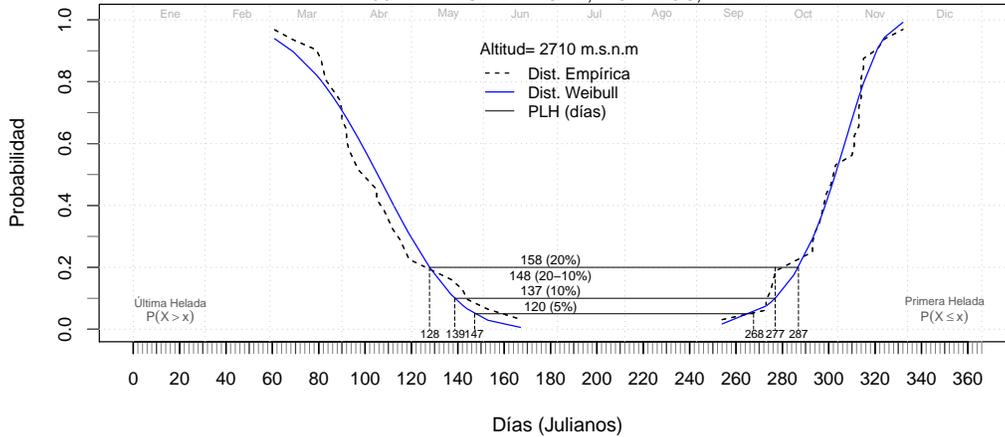
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15069 POLOTITLAN, POLOTITLAN, MEX.



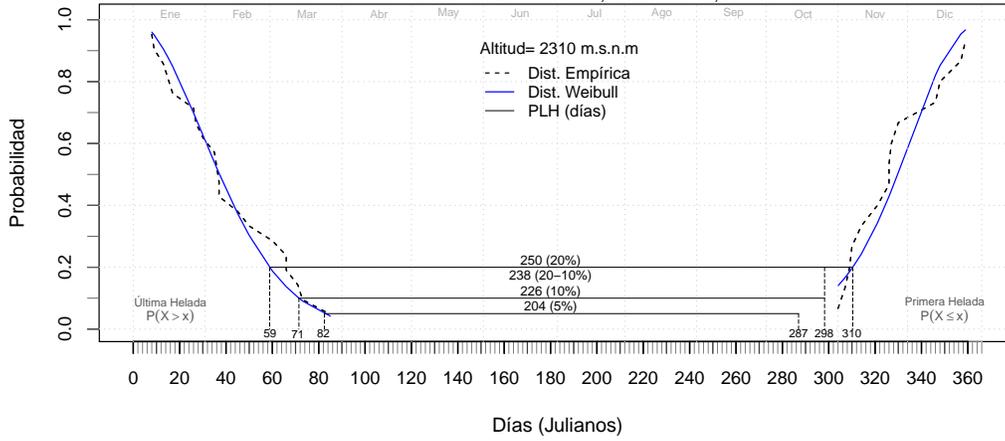
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15071 PRESA EL TIGRE, MORELOS, MEX.



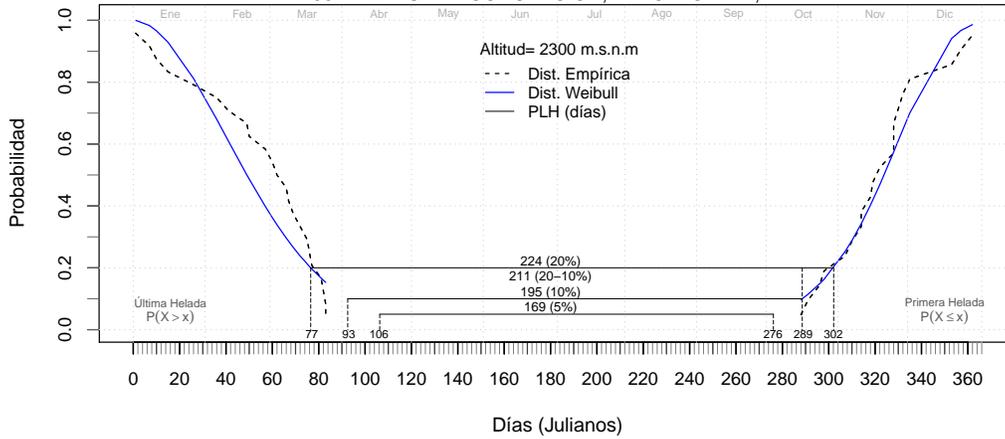
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15073 PRESA GUADALUPE, TULTITLAN, MEX.



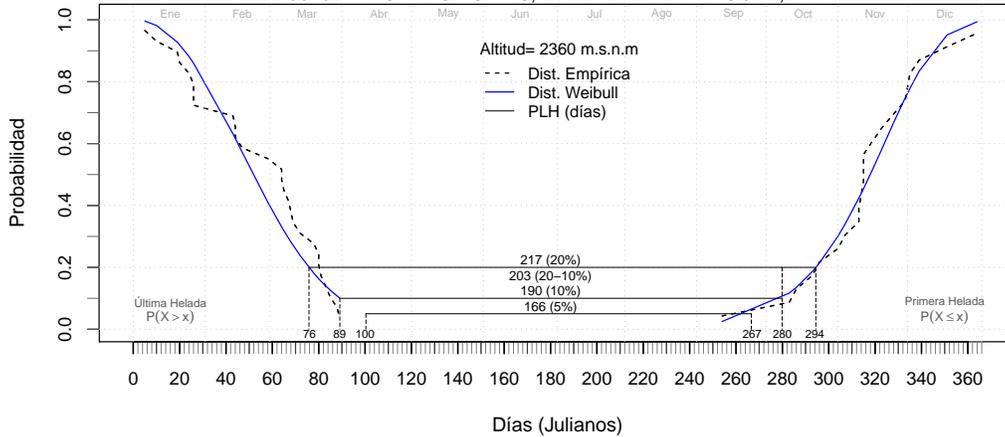
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15074 PRESA LA CONCEPCION, TEPOTZOTLAN, MEX.



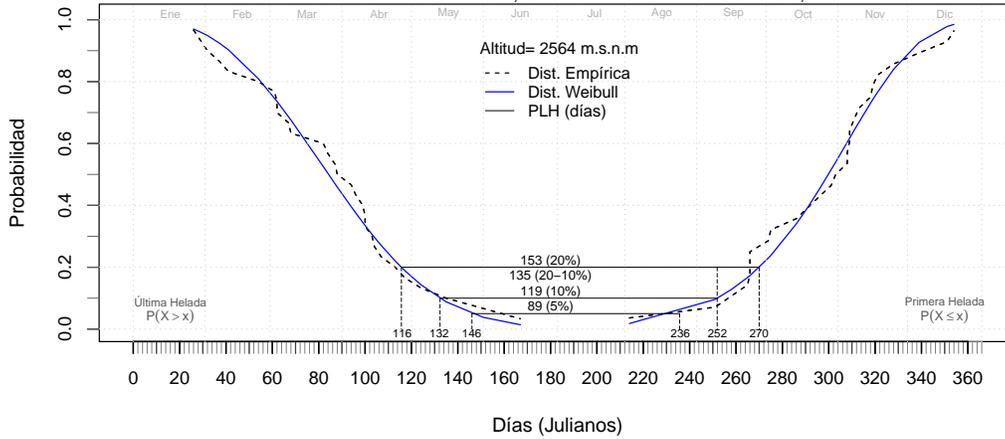
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15075 PRESA LAS RUINAS, ATIZAPAN DE ZARAGOZA, MEX.



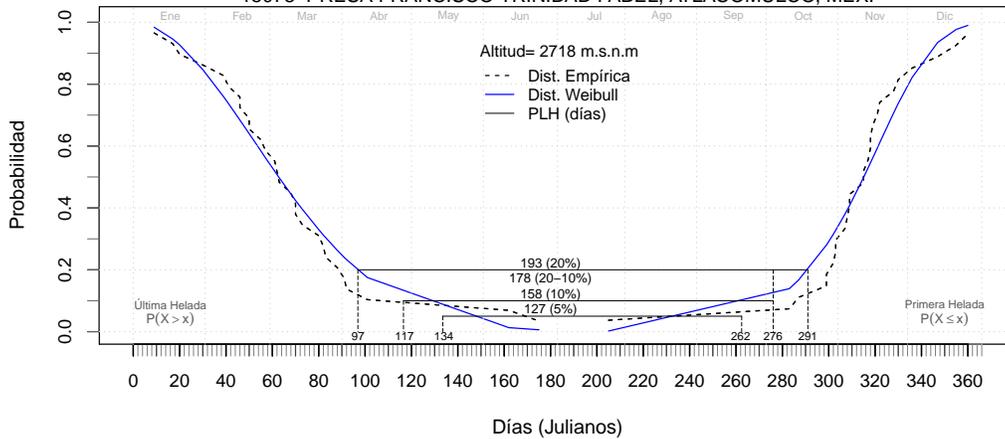
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15076 PRESA TEPETITLAN, SAN FELIPE DEL PROGRESO, MEX.



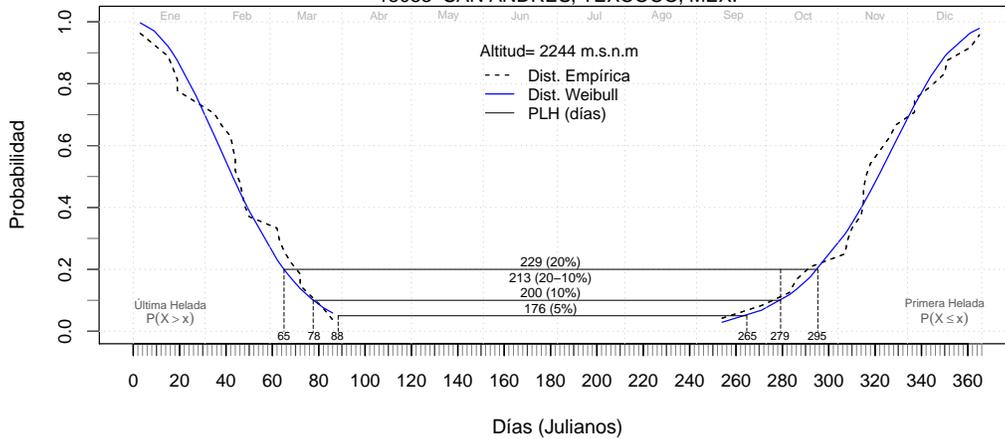
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15078 PRESA FRANCISCO TRINIDAD FABEL, ATLACOMULCO, MEX.



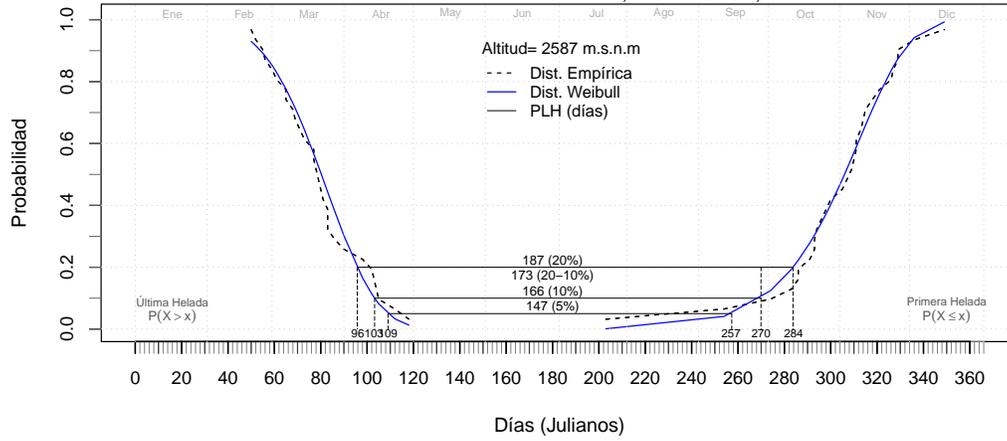
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15083 SAN ANDRES, TEXCOCO, MEX.



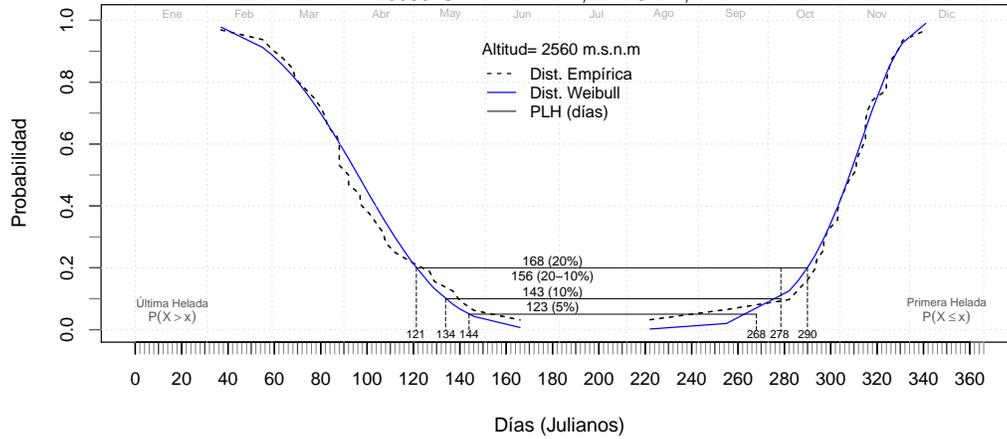
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15085 SAN BARTOLO DEL LLANO, IXTLAHUACA, MEX.



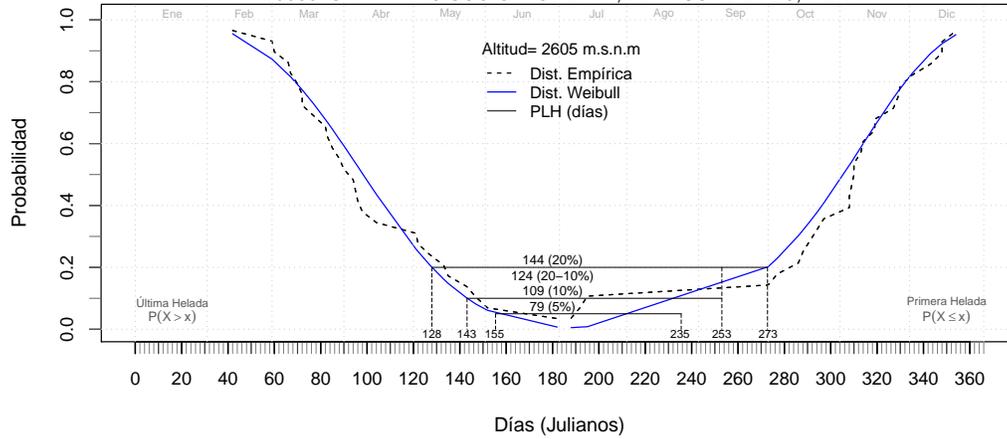
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15086 SAN BERNABE, TEMOAYA, MEX.



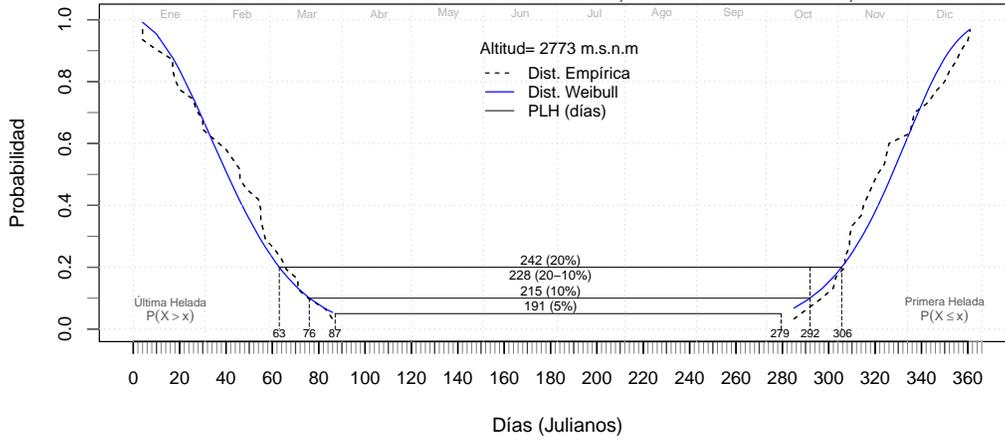
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15088 SAN FRANCISCO OXTOTILPAN, TEMASCALTEPEC, MEX.



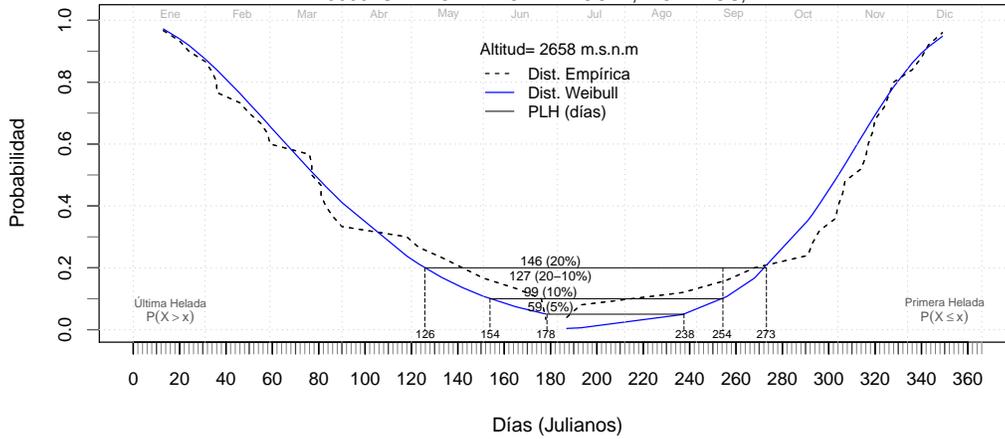
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15089 SAN FRANCISCO TLALCILALCAPAN, ALMOLOYA DE JUAREZ, MEX.



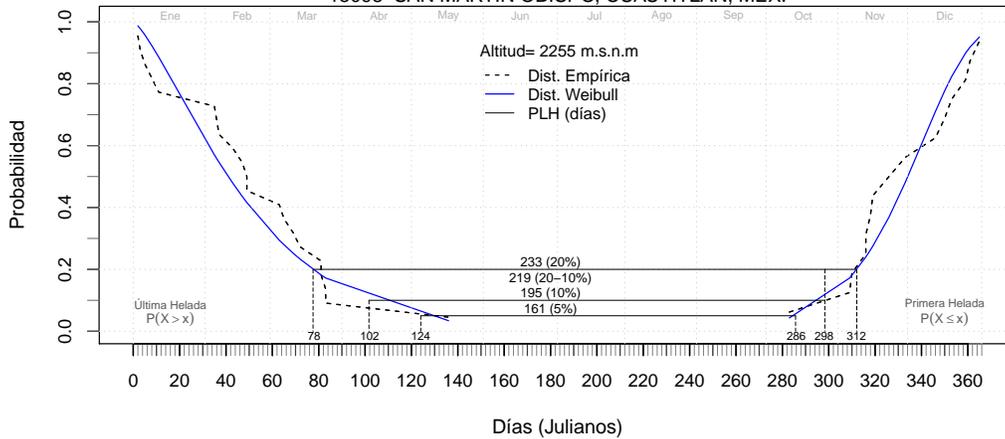
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15093 SAN LORENZO MALACOTA, MORELOS, MEX.



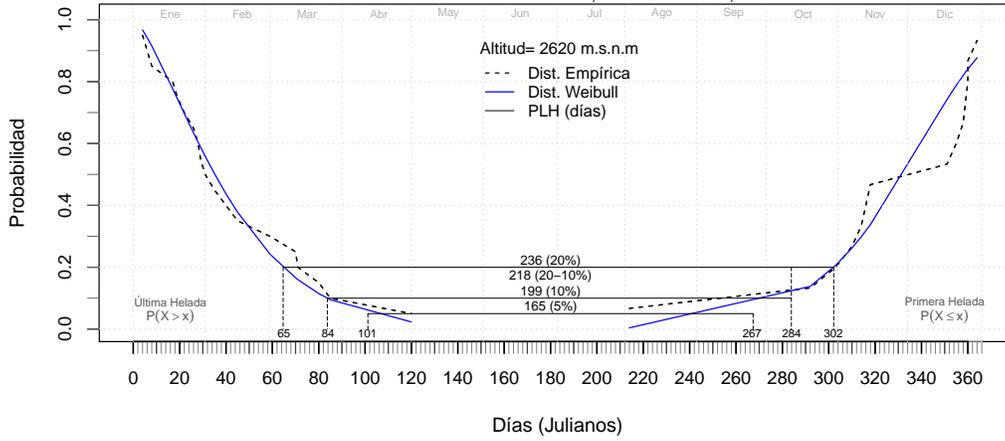
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15098 SAN MARTIN OBISPO, CUAUTITLAN, MEX.



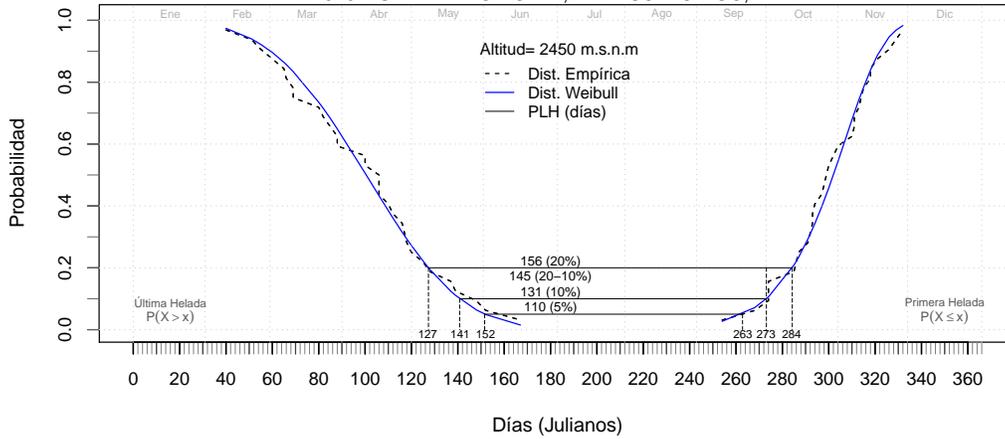
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15103 SAN PEDRO NEXAPA, AMECAMECA, MEX.



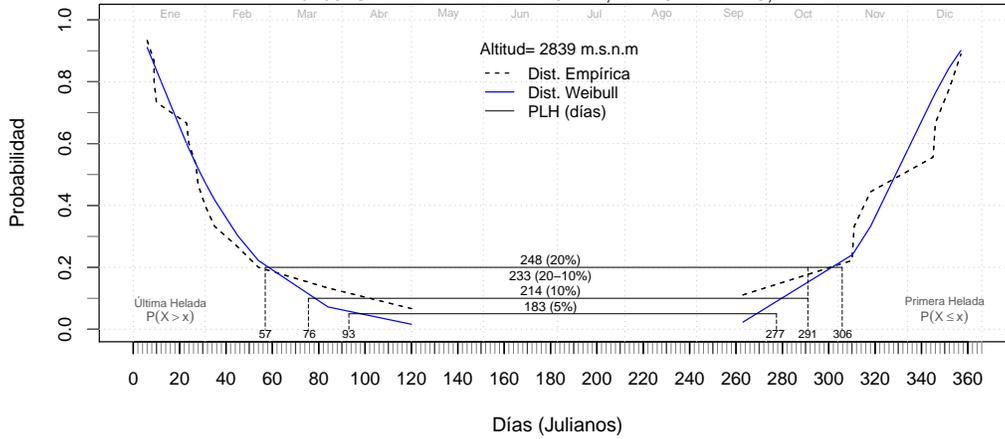
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15104 SAN PEDRO POTLA, TEMASCALINGO, MEX.



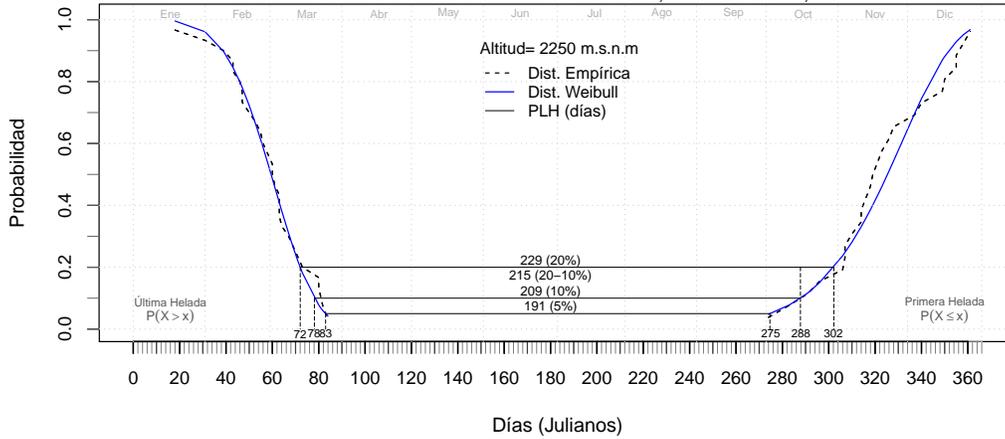
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15108 SANTA MARIA DEL MONTE, ZINACANTEPEC, MEX.



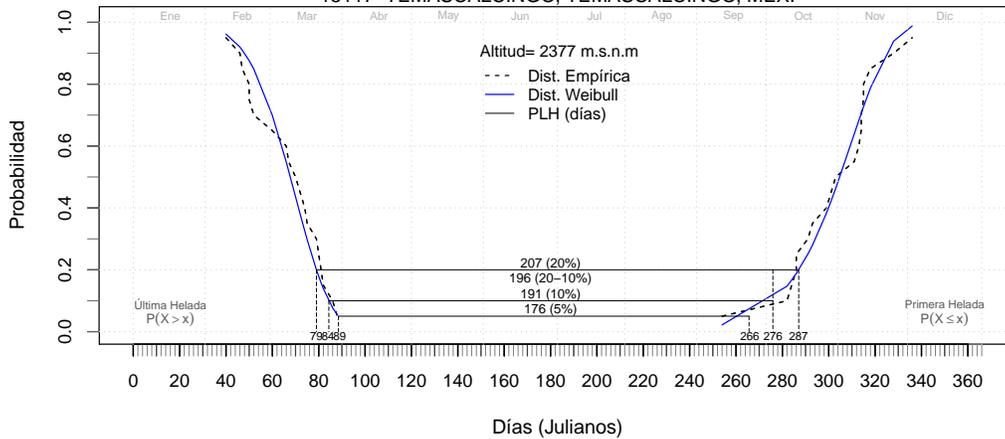
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15115 SANTO TOMAS PUENTE COLGANTE, TEOLYUCAN, MEX.



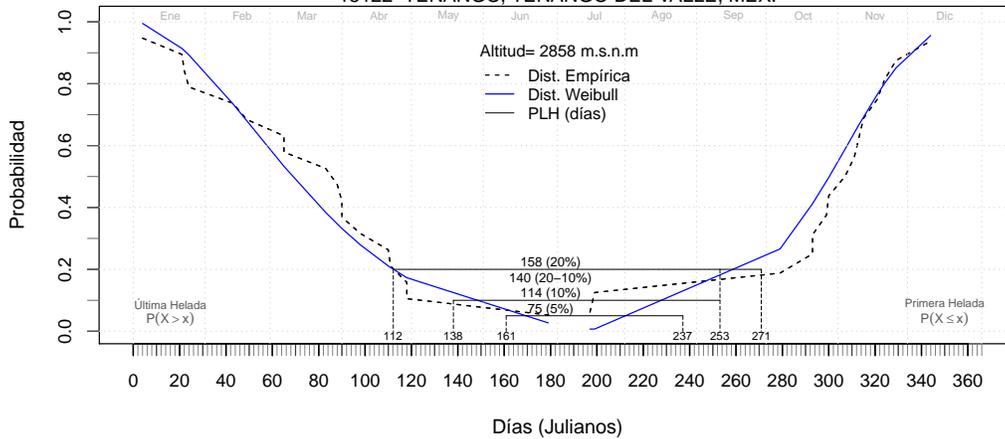
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15117 TEMASCALCINGO, TEMASCALCINGO, MEX.



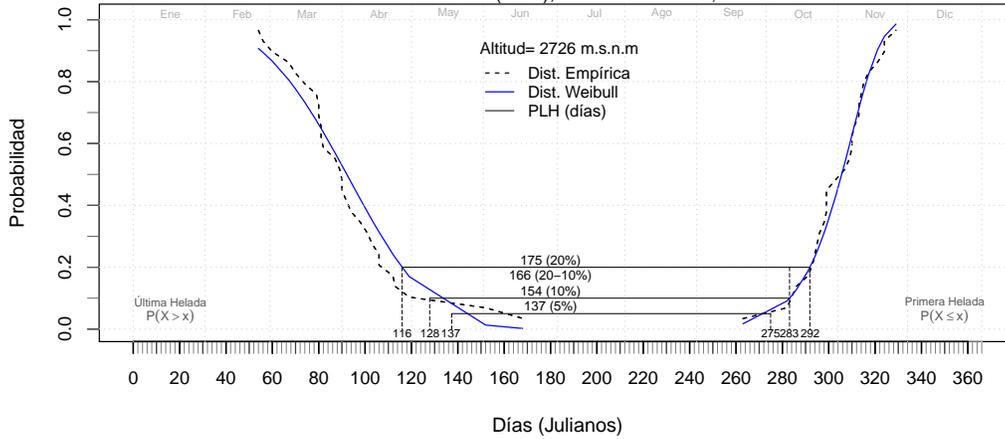
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15122 TENANGO, TENANGO DEL VALLE, MEX.



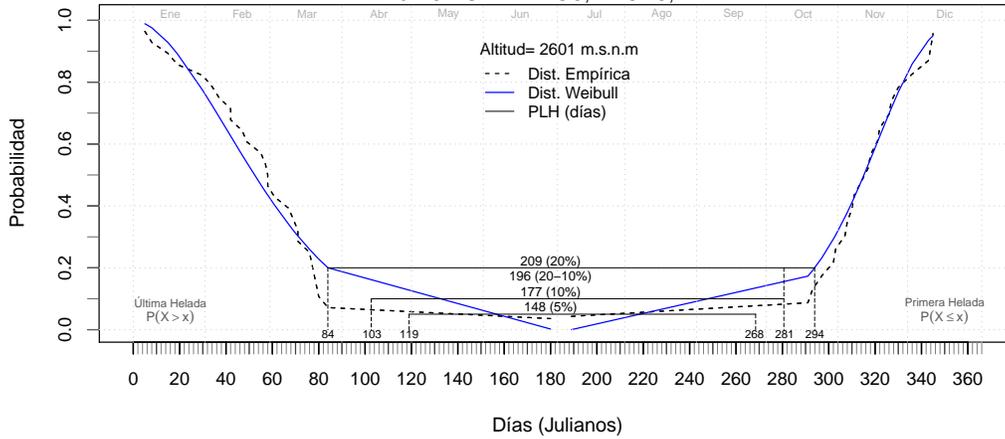
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15126 TOLUCA (OBS), ZINACANTEPEC, MEX.



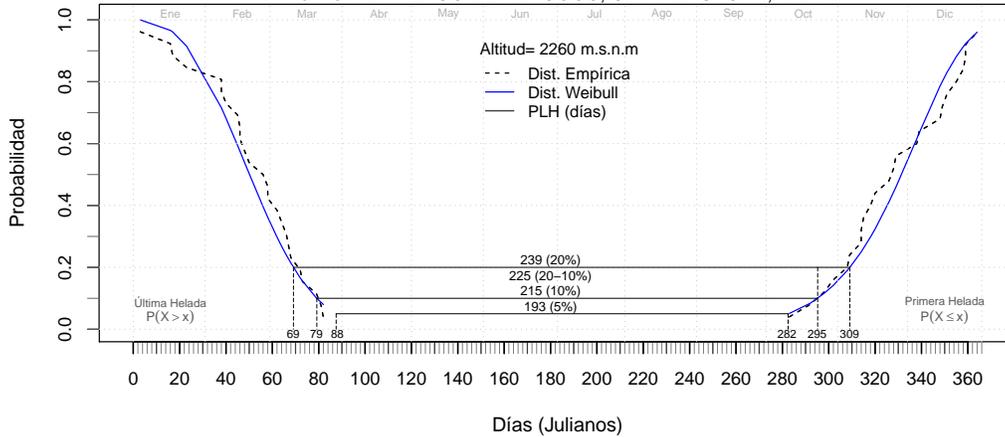
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15128 TULTENANGO, EL ORO, MEX.



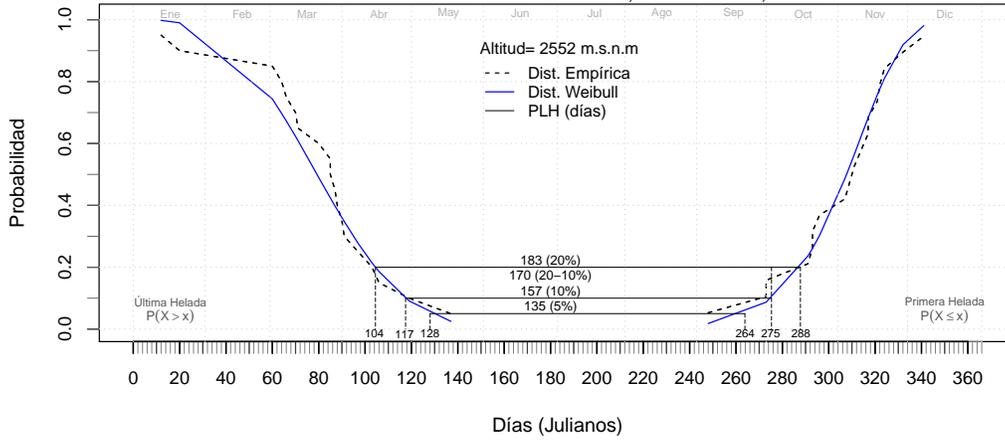
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15145 PLAN LAGO DE TEXCOCO, CHIMALHUACAN, MEX.



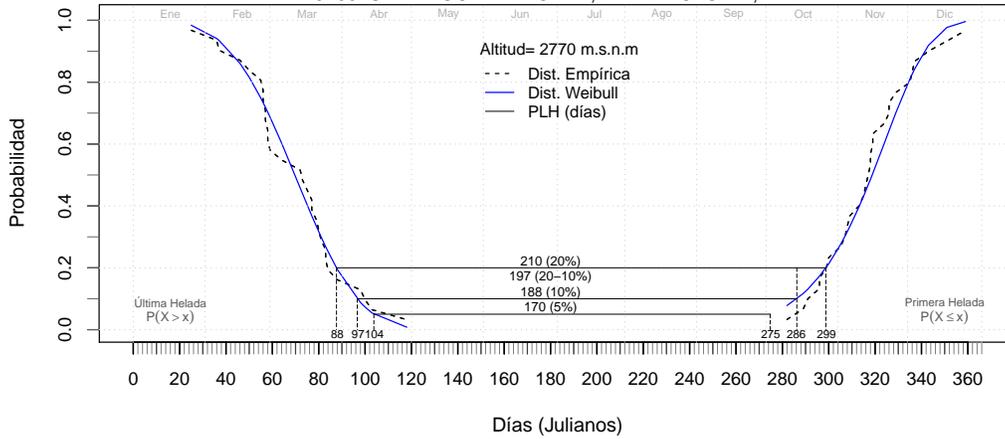
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15158 SAN PEDRO DE LOS BAÑOS, IXTLAHUACA, MEX.



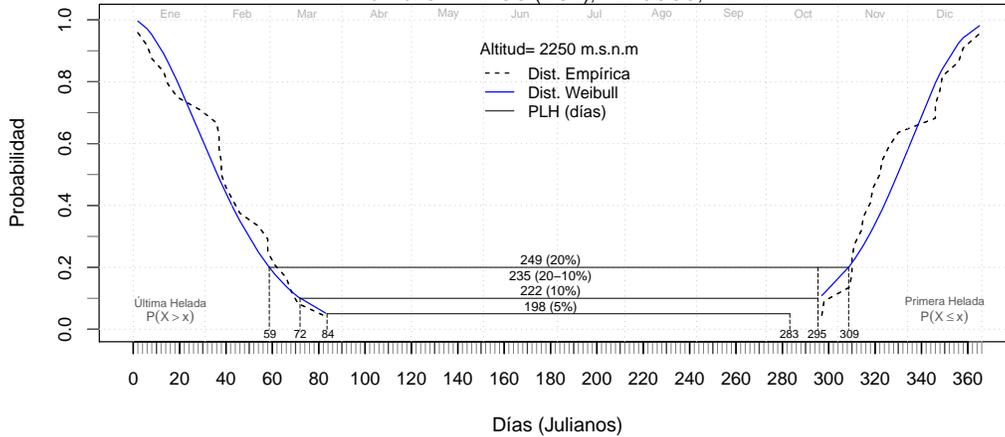
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15160 SANTIAGO DEL MONTE, VILLA VICTORIA, MEX.



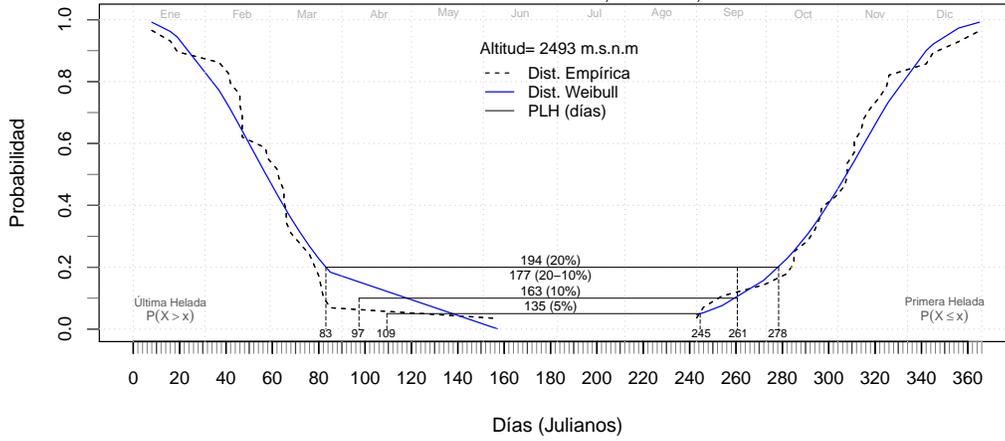
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15170 CHAPINGO (DGE), TEXCOCO, MEX.



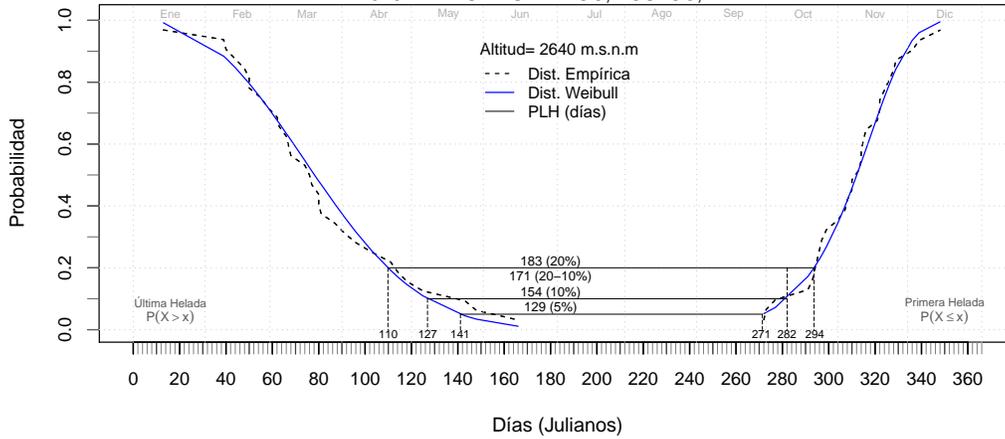
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15185 PRESA EL MOLINO, ACULCO, MEX.



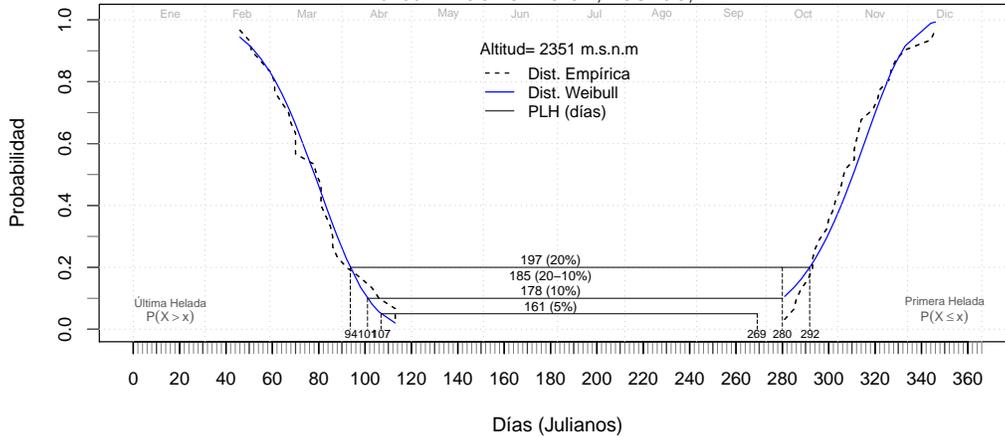
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15187 PRESA HUAPANGO, ACULCO, MEX.



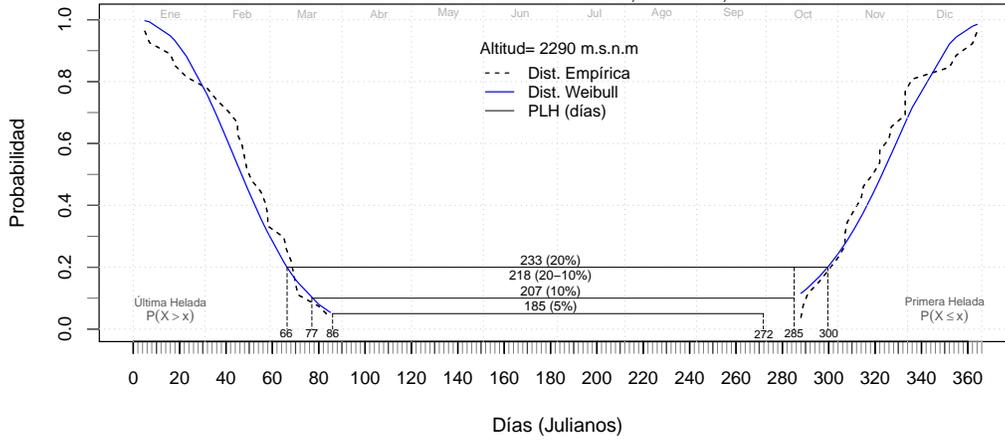
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15189 LA CONCEPCION, ACULCO, MEX.



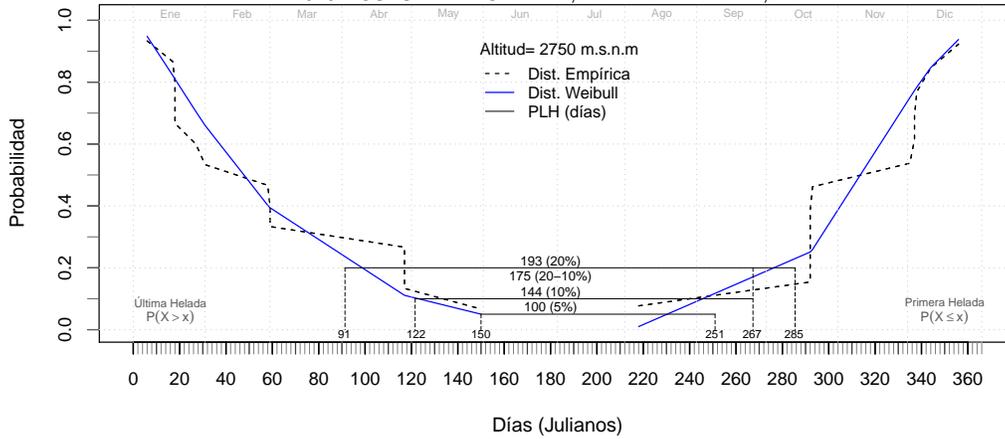
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15190 PRESA SAN ILDEFONSO, ACULCO, MEX.



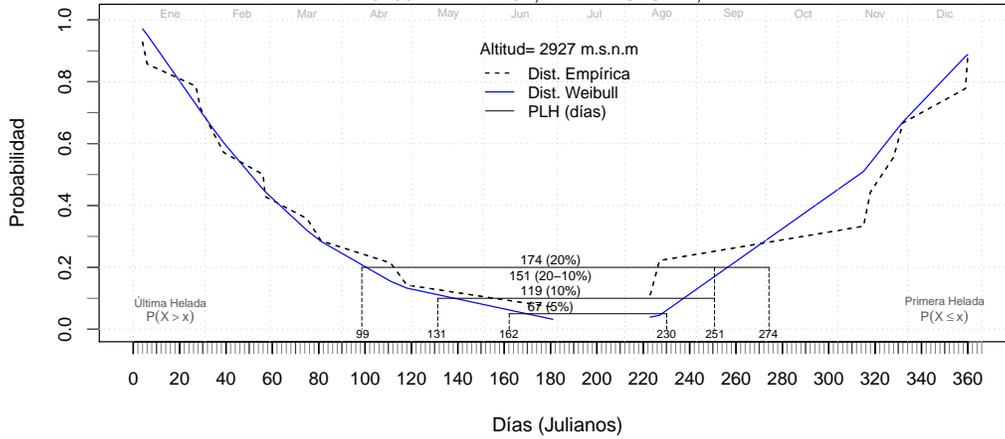
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15197 CUESTA DEL CARMEN, VILLA DE ALLENDE, MEX.



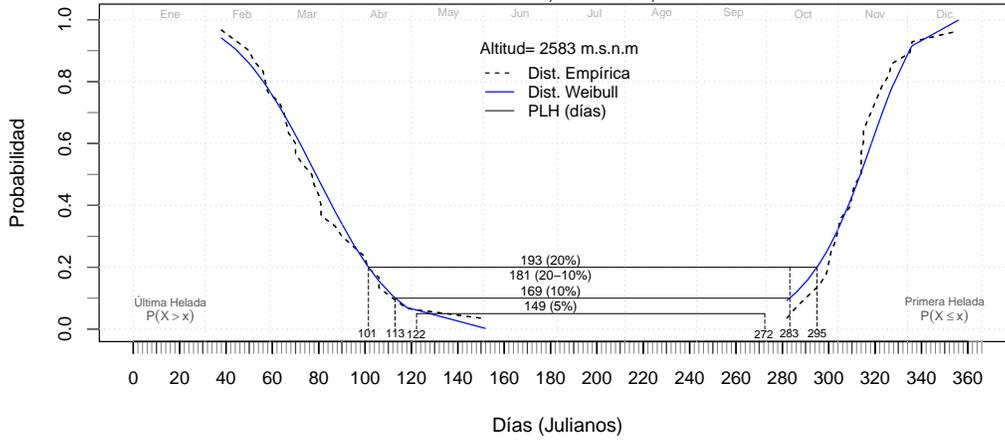
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15199 MINA VIEJA, VILLA VICTORIA, MEX.



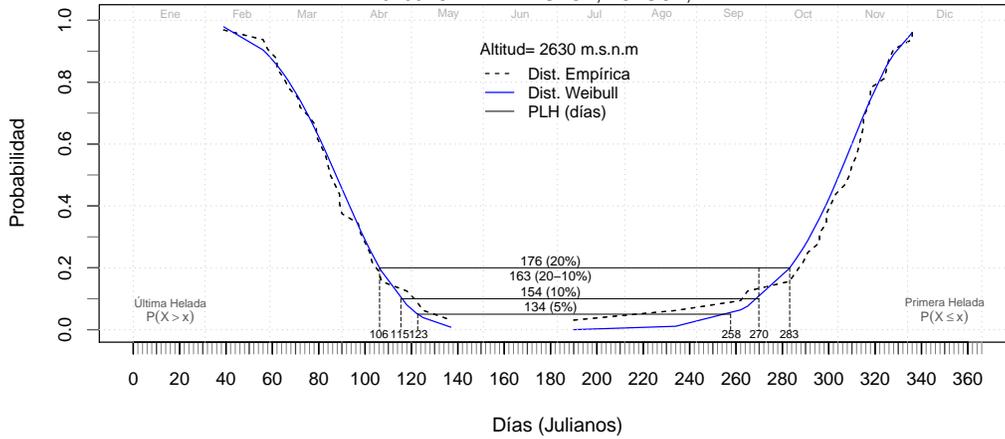
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15201 TROJES, TEMOAYA, MEX.



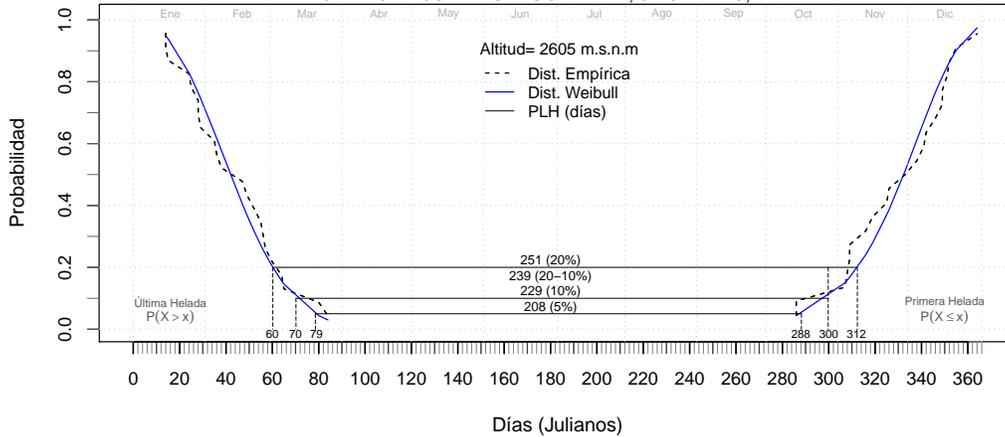
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15203 CALIXTLAHUACA, TOLUCA, MEX.



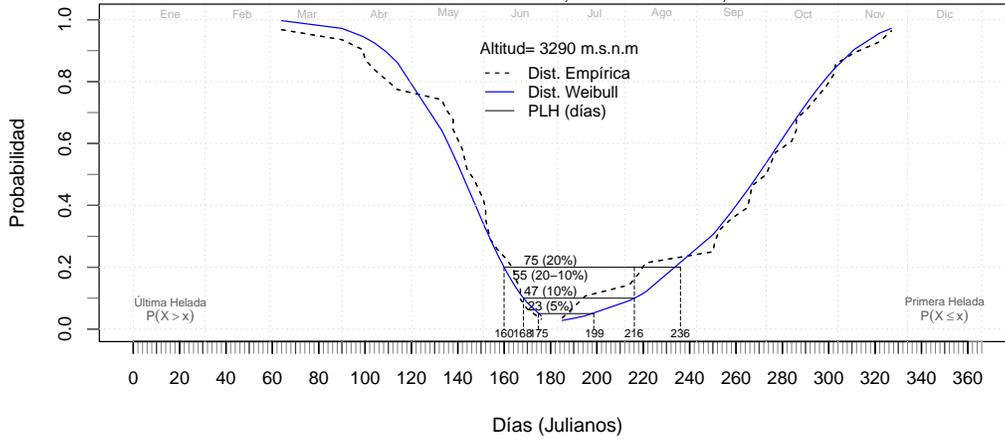
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15217 SAN JUAN ACAZUCHITLAN, JILOTEPEC, MEX.



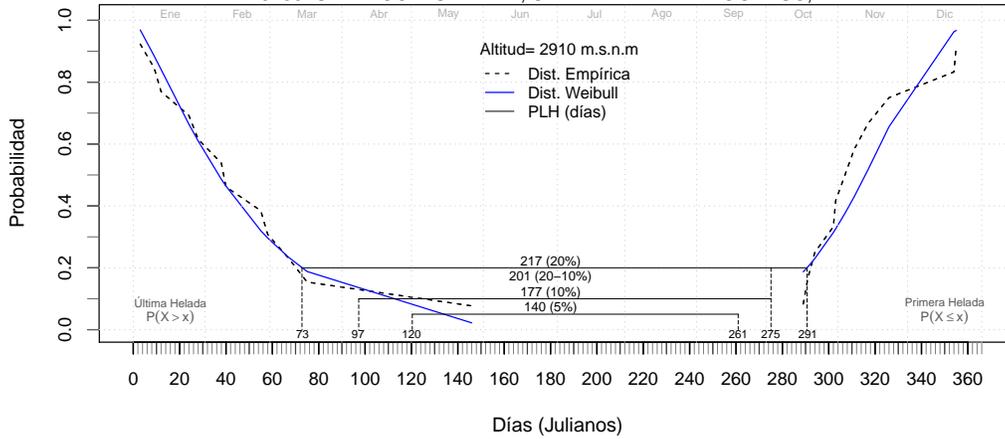
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15231 PRESA ITURBIDE, ISIDRO FABELA, MEX.



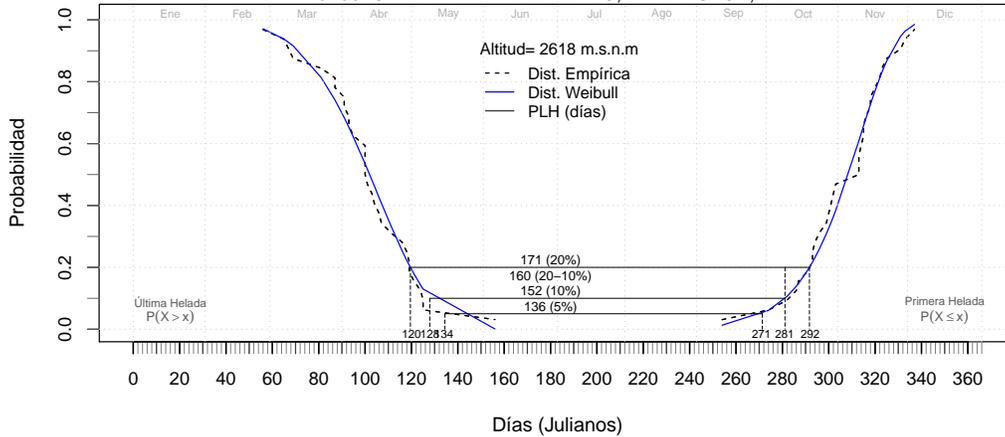
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15233 SAN NICOLAS MAVATI, SAN FELIPE DEL PROGRESO, MEX.



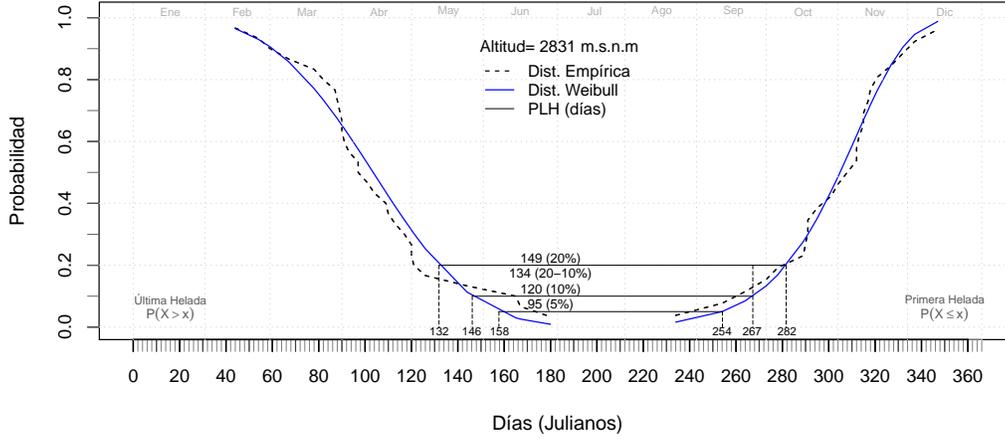
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15238 SANTA MARIA DEL LLANO, IXTLAHUACA, MEX.



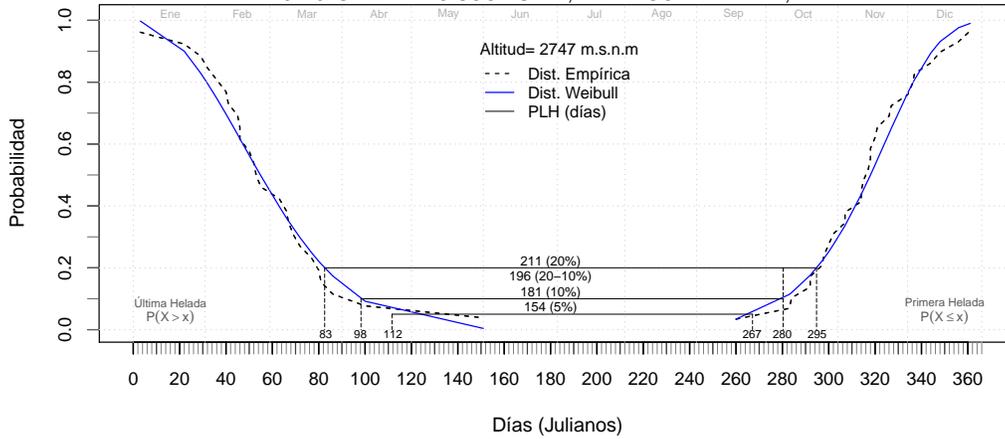
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15239 SAN ANTONIO TROJES, MORELOS, MEX.



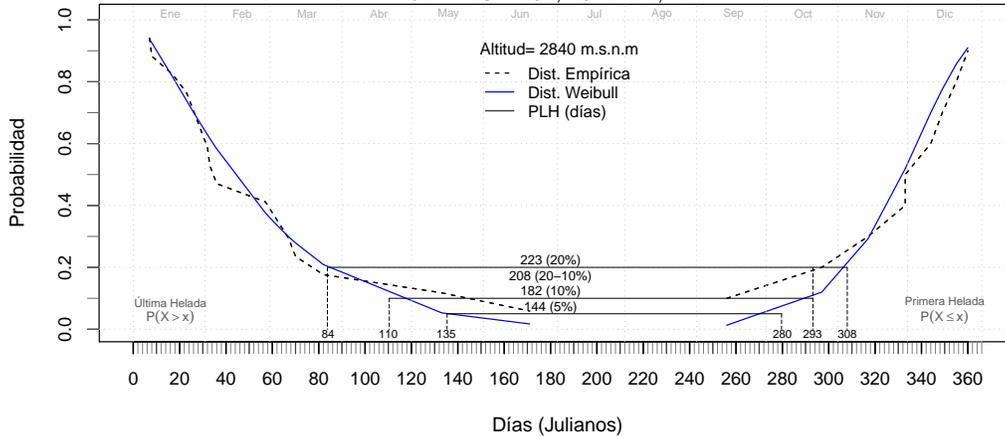
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15240 SAN FRANCISCO PUTLA, TENANGO DEL VALLE, MEX.



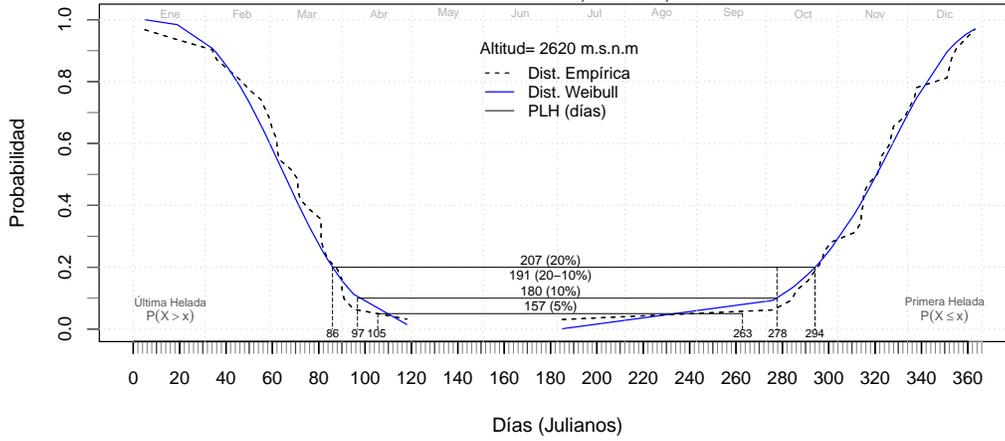
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15244 MUYTEJE, ACAMBAY, MEX.



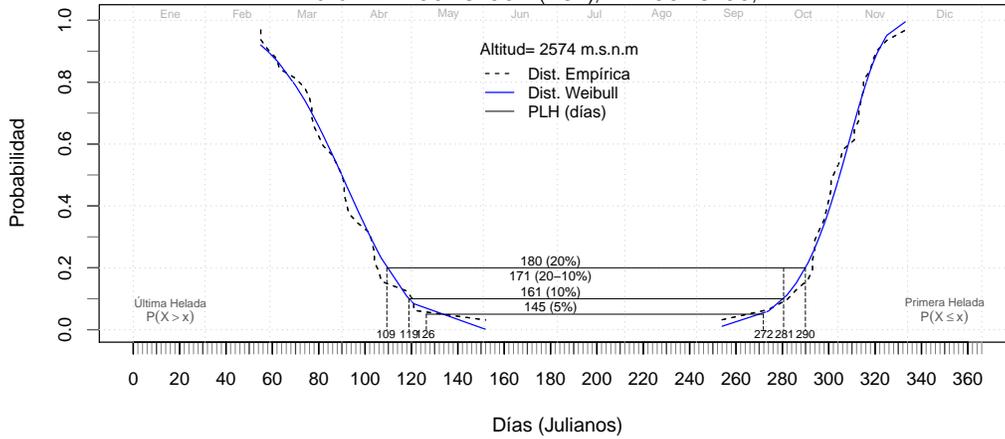
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15245 LA JORDANA, EL ORO, MEX.



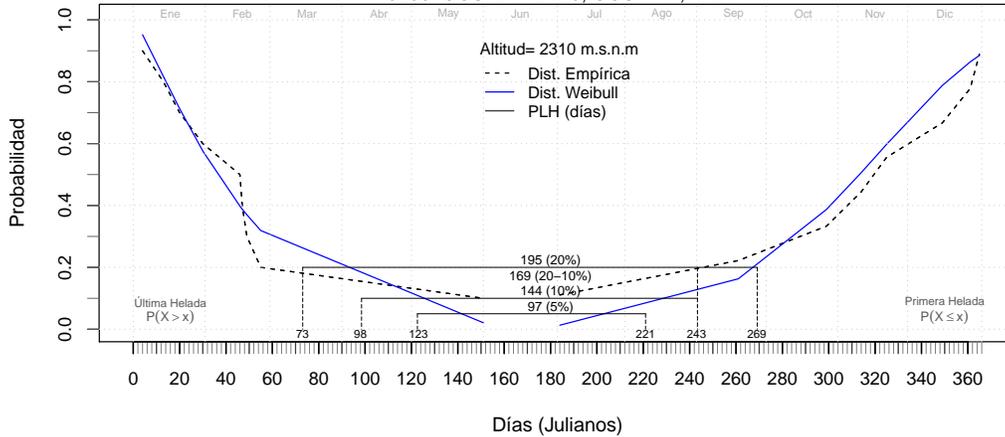
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15251 ATACOMULCO II (DGE), ATACOMULCO, MEX.



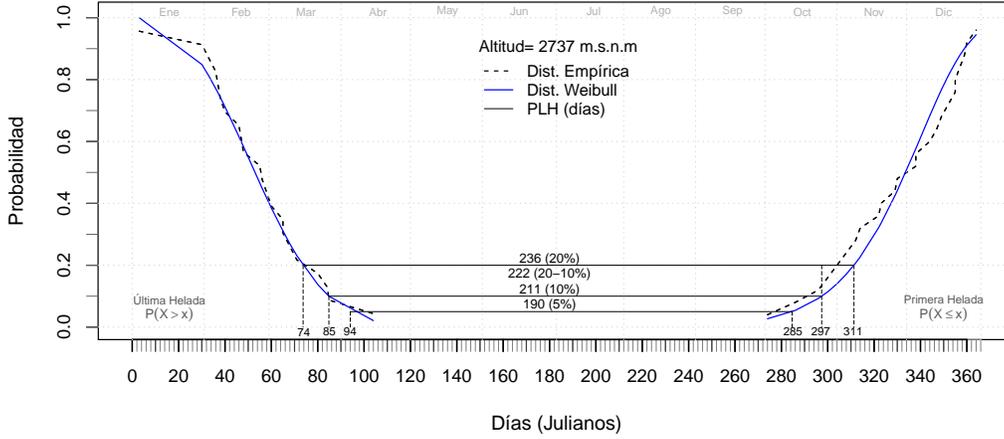
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15256 OCUILAN E-23, OCUILAN, MEX.



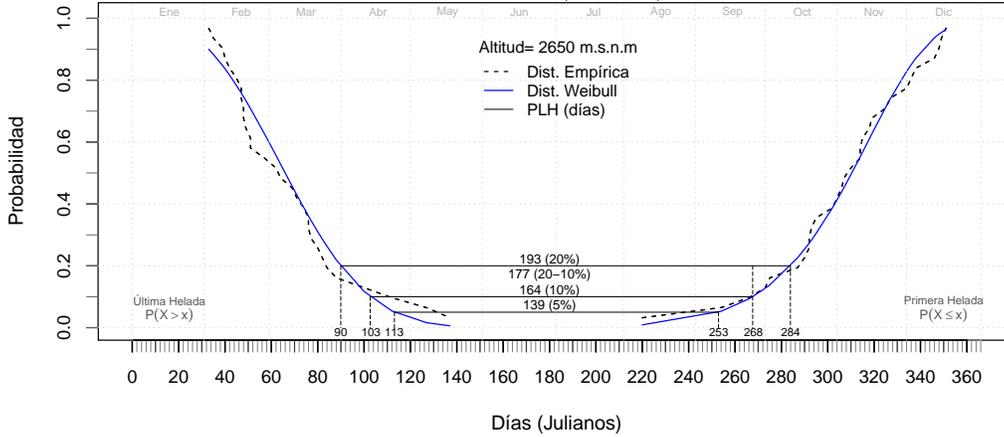
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15260 SAN LUCAS TOTOLMALOYA, ACULCO, MEX.



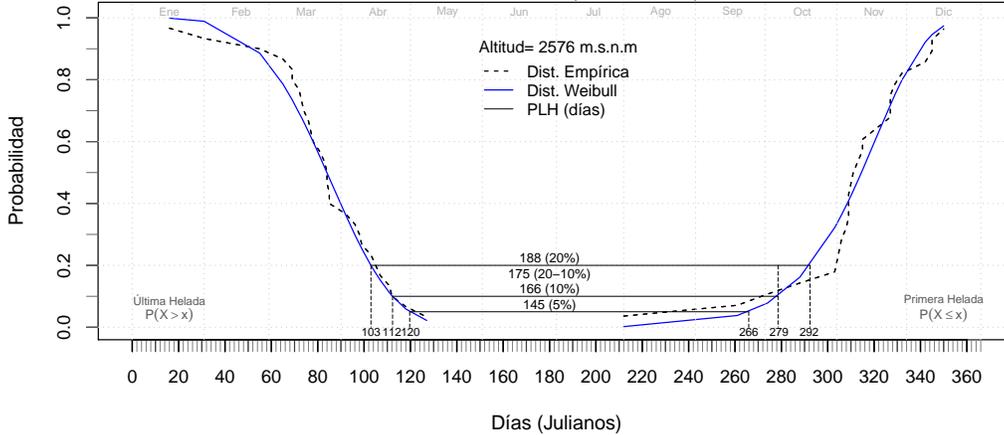
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15261 EL JAZMIN, ACULCO, MEX.



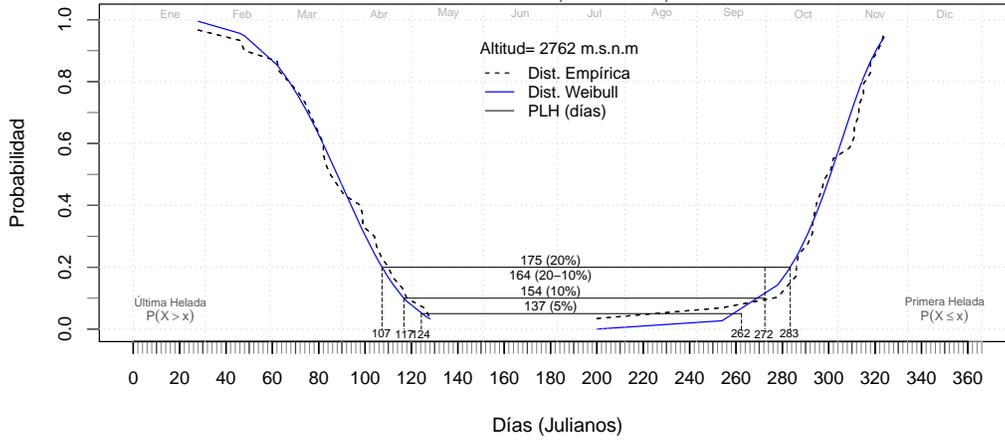
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15264 BUENOS AIRES, JIQUIPILCO, MEX.



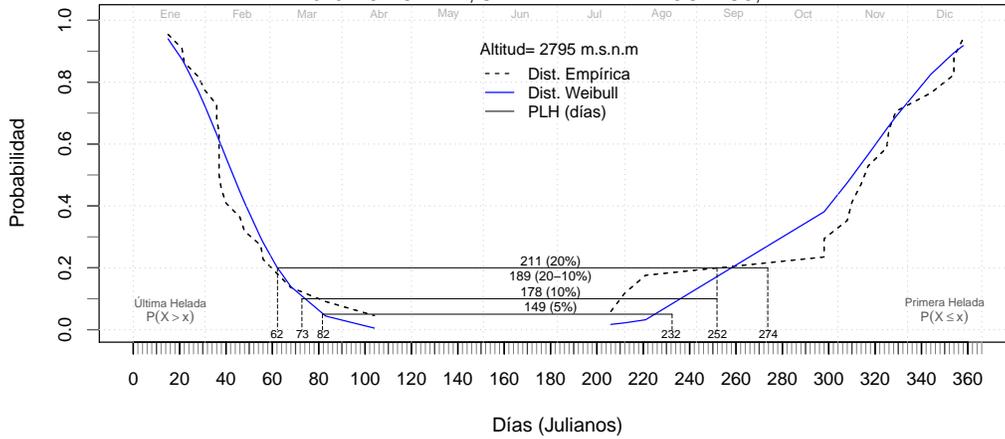
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15266 CODAGEM, METEPEC, MEX.



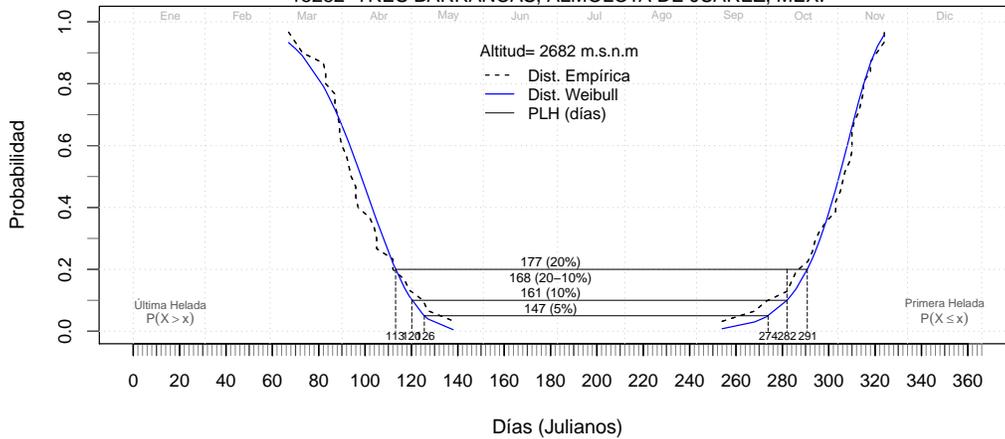
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15267 CHICHILPA, SAN FELIPE DEL PROGRESO, MEX.



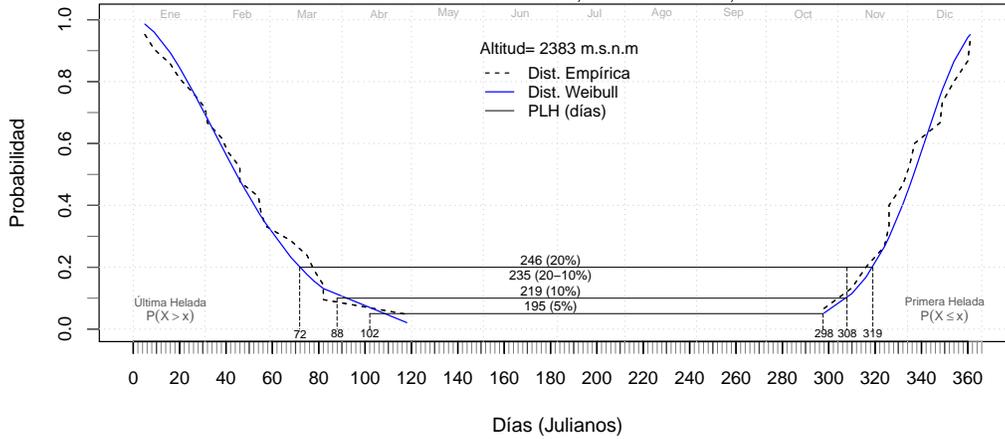
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15282 TRES BARRANCAS, ALMOLOYA DE JUAREZ, MEX.



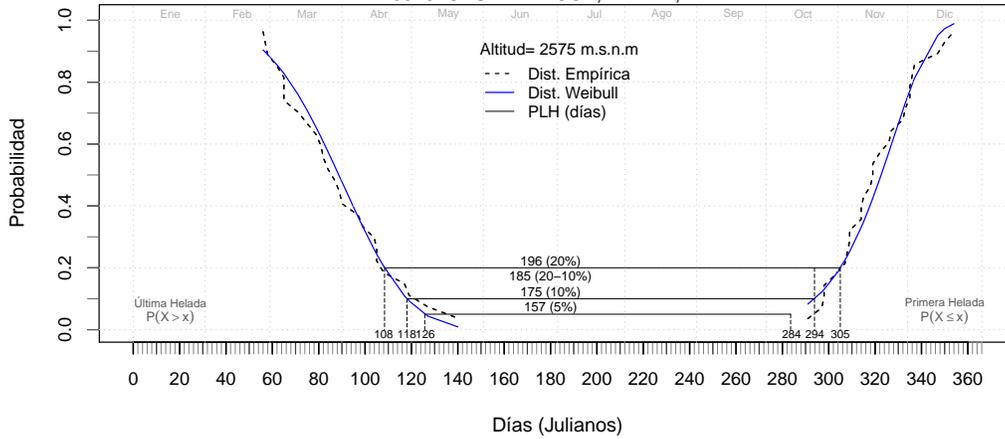
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15301 TEXCALTITLAN D-7, TEXCALTITLAN, MEX.



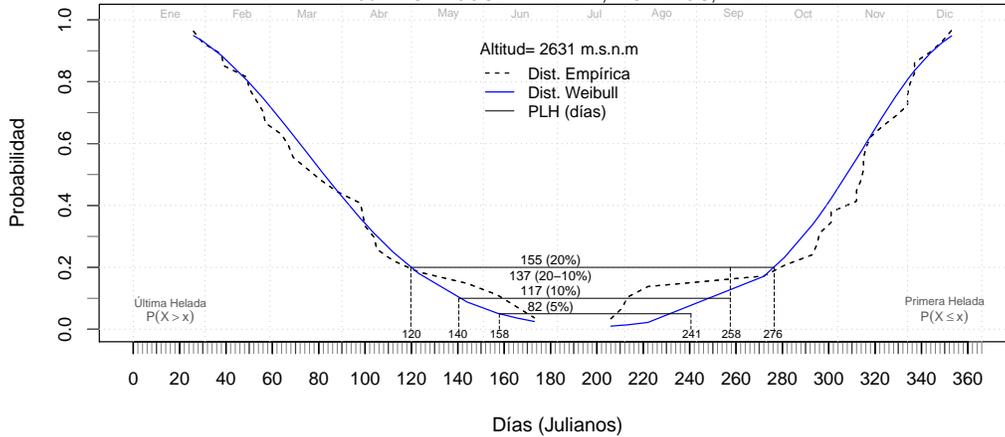
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15315 CASETA EPCCA, LERMA, MEX.



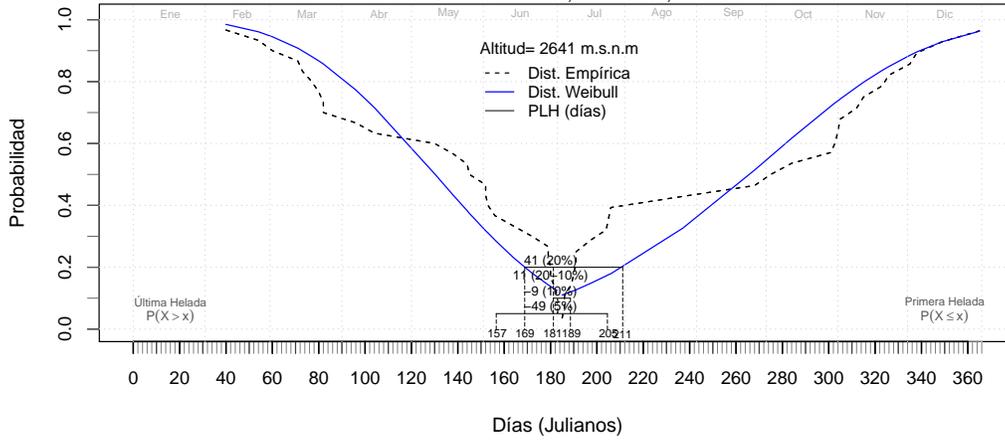
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15317 SAN JOSE EPIFANIA, MORELOS, MEX.



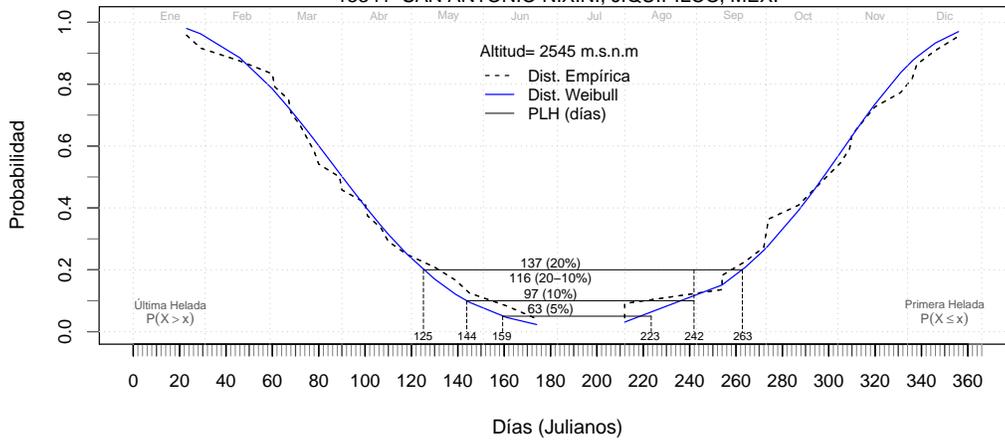
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15333 EL PALMITO, TIMILPAN, MEX.



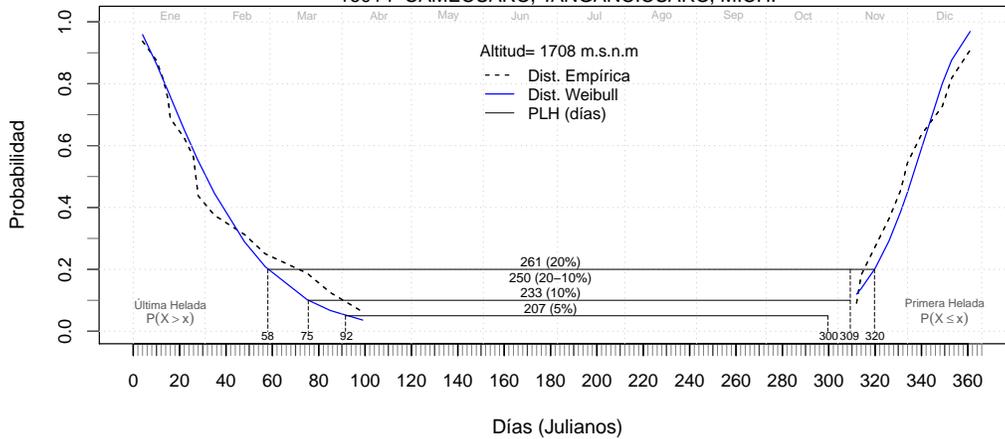
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

15341 SAN ANTONIO NIXINI, JIQUIPILCO, MEX.



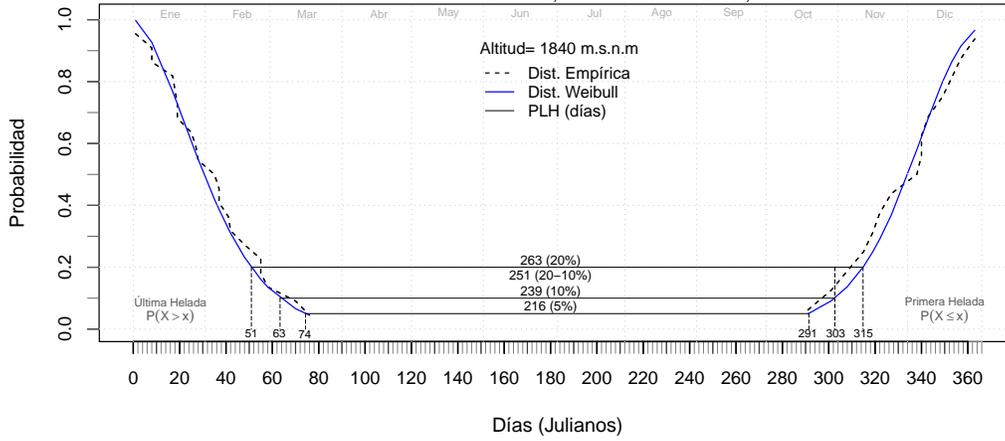
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

16014 CAMECUARO, TANGANCICUARO, MICH.



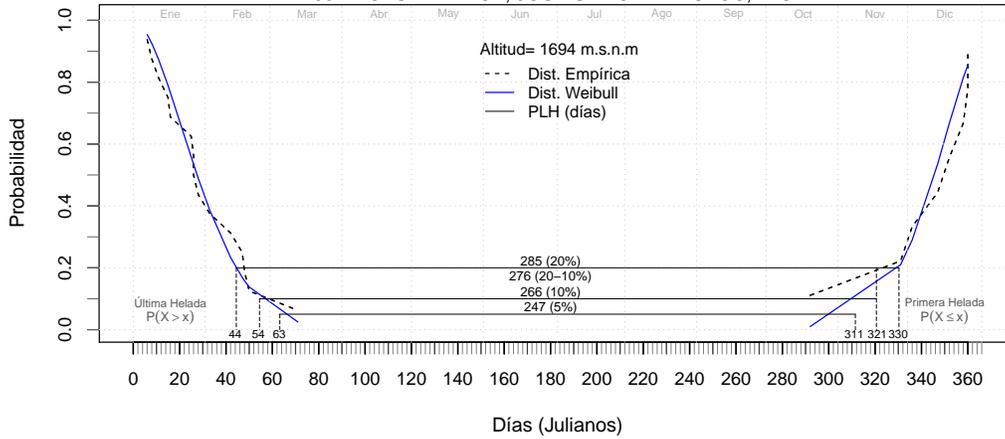
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

16016 CARRILLO PUERTO, ALVARO OBREGON, MICH.



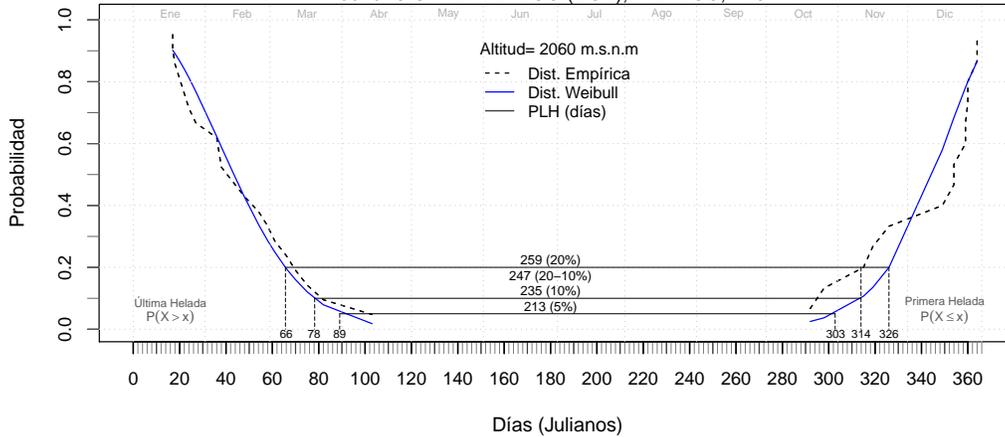
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

16017 CASA BLANCA, JOSE SIXTO VERDUZCO, MICH.



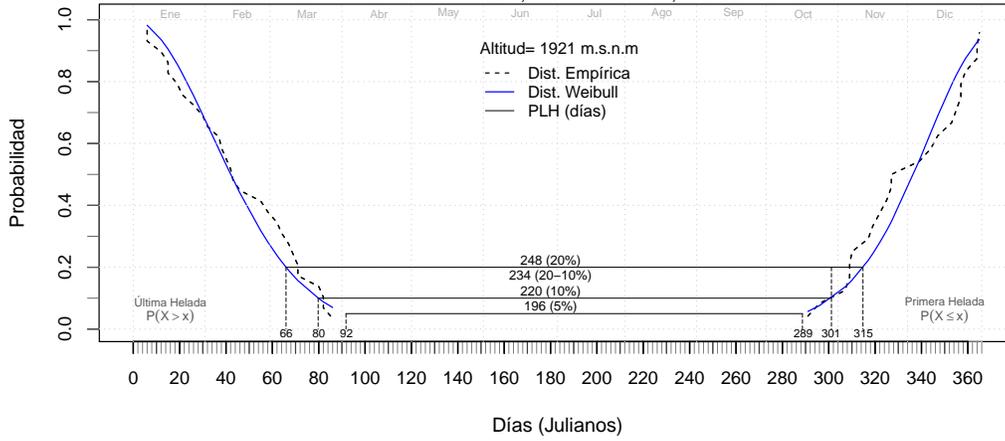
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

16020 CIUDAD HIDALGO (DGE), HIDALGO, MICH.



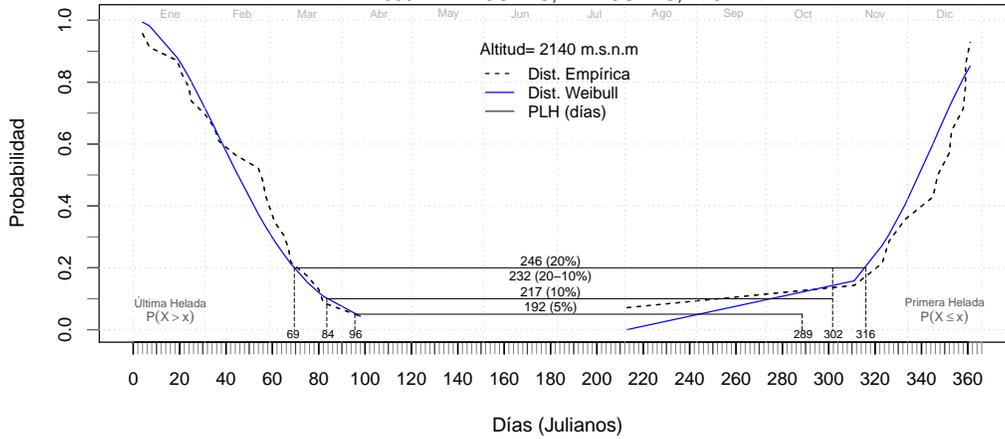
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

16052 HUINGO, ZINAPECUARO, MICH.



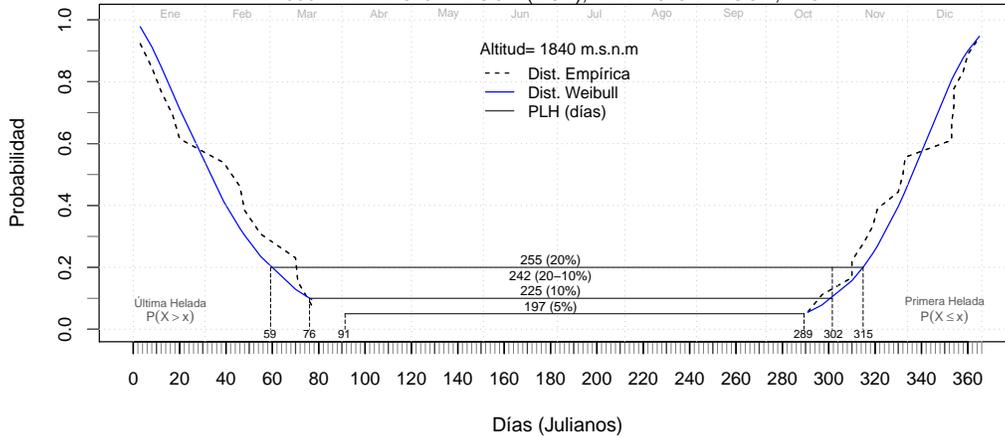
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

16087 PATZCUARO, PATZCUARO, MICH.



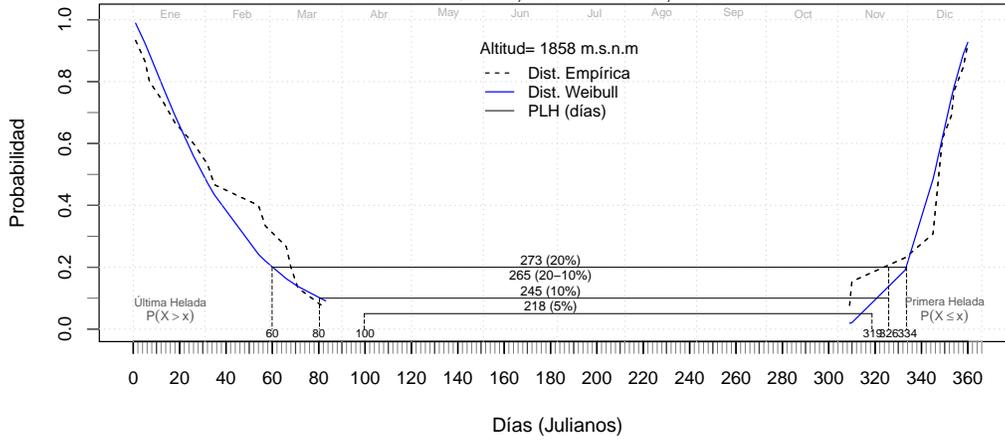
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

16091 ALVARO OBREGON (DGE), ALVARO OBREGON, MICH.



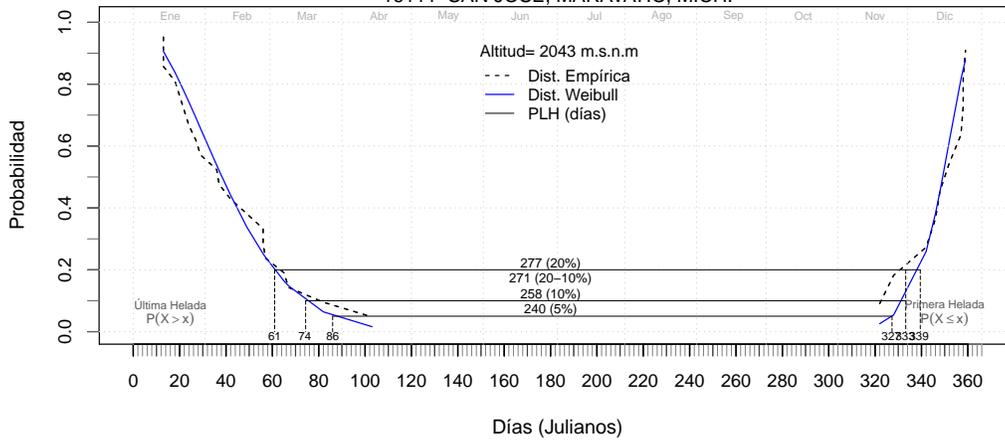
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

16105 QUIRIO, INDAPARAPEO, MICH.



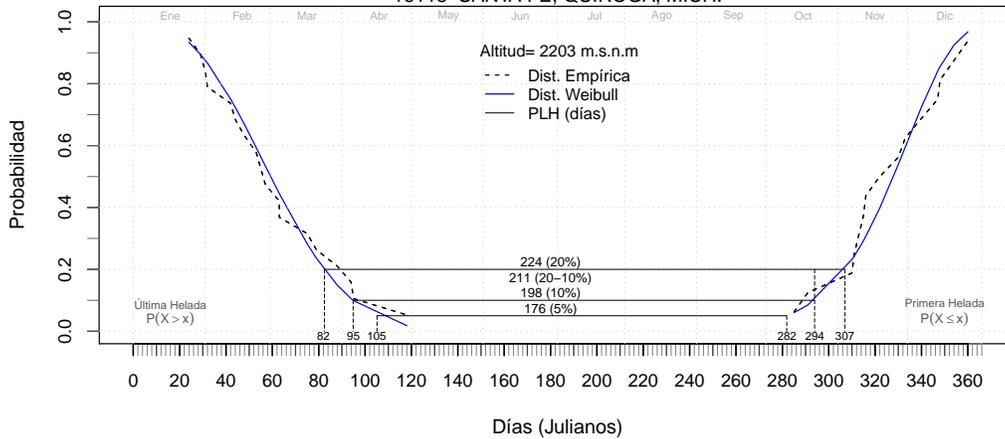
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

16111 SAN JOSE, MARAVATIO, MICH.



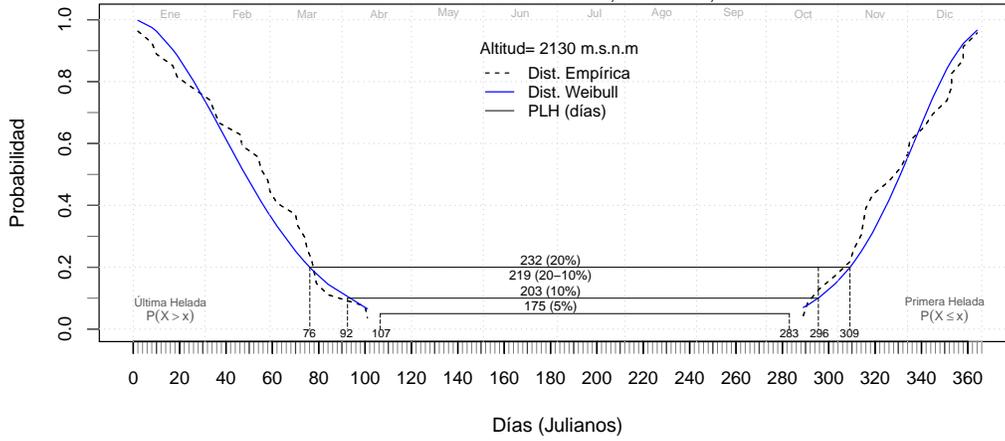
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

16118 SANTA FE, QUIROGA, MICH.



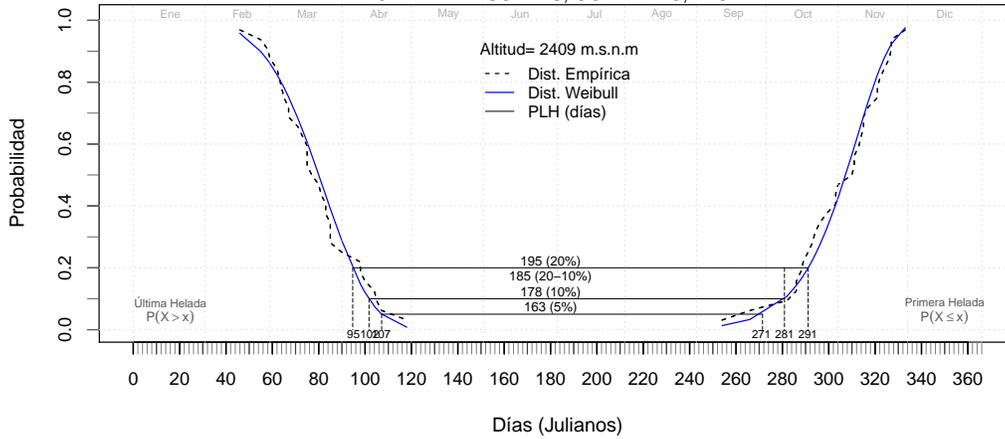
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

16120 SANTIAGO UNDAMEO, MORELIA, MICH.



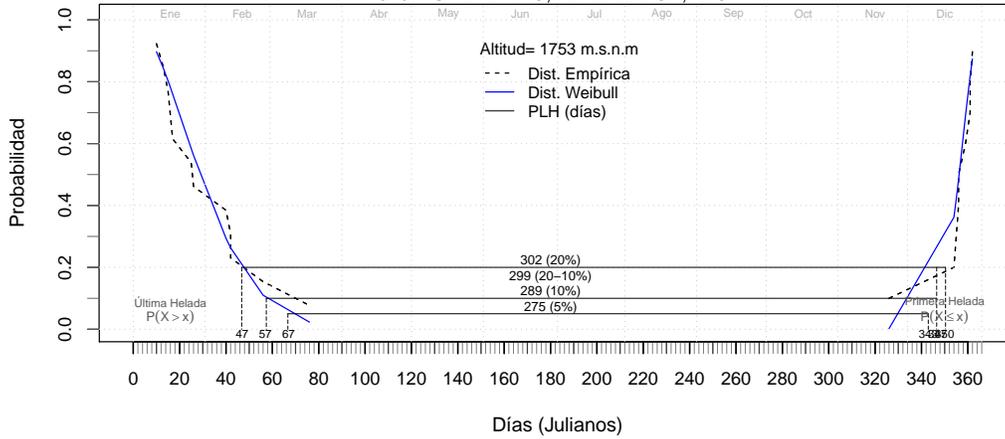
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

16124 TEMASCALES, CONTEPEC, MICH.



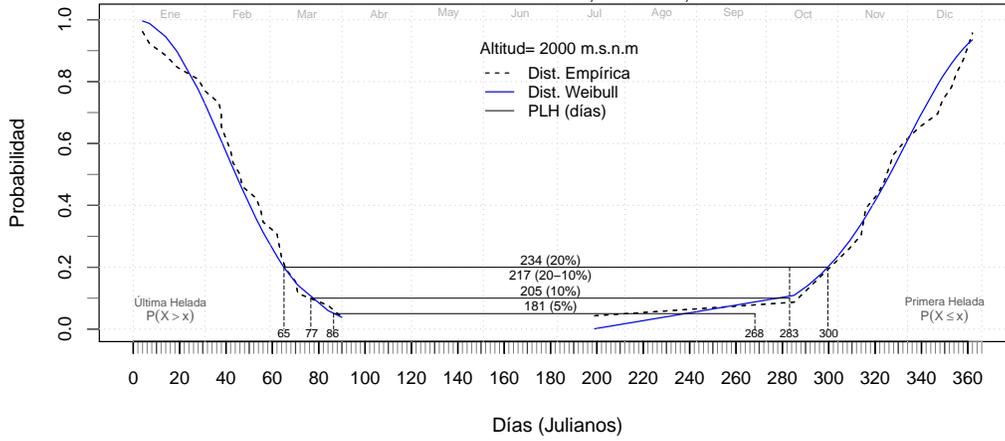
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

16137 UREPETIRO, TLAZAZALCA, MICH.



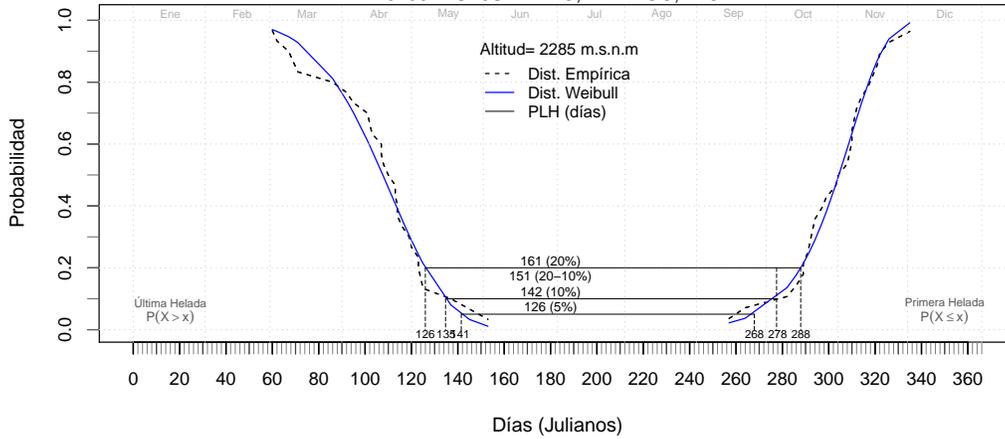
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

16225 VILLA JIMENEZ II, JIMENEZ, MICH.



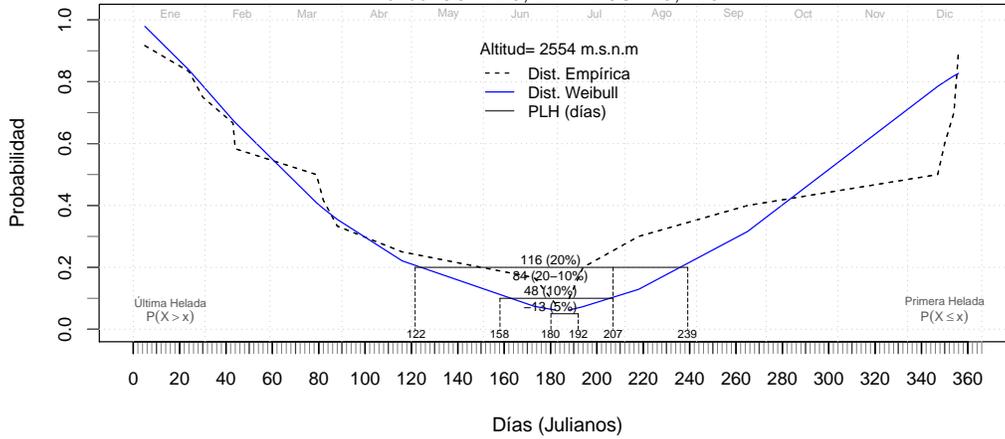
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

16235 HUAJUMBARO, HIDALGO, MICH.



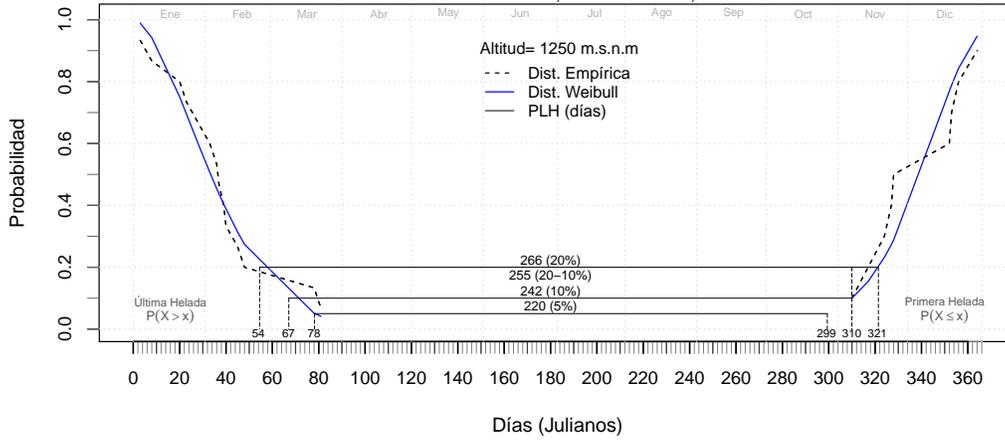
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

16255 UCAREO, ZINAPECUARO, MICH.



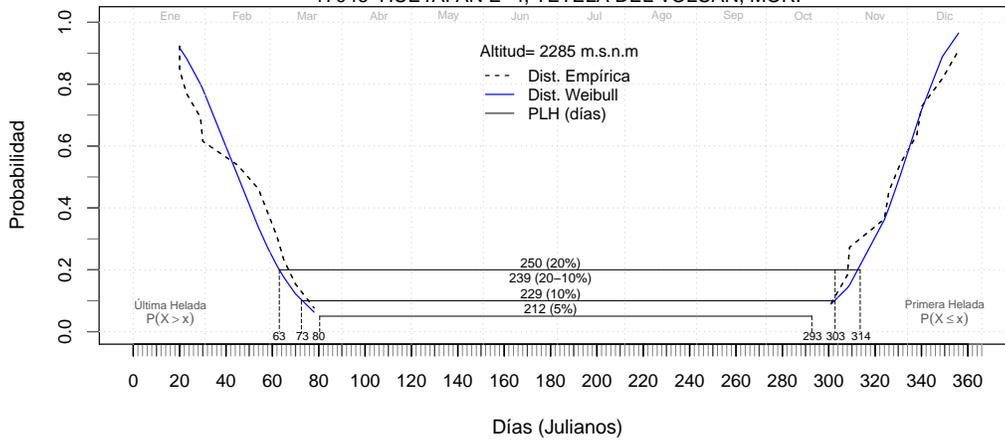
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

17021 TLACUALERA, TEPALCINGO, MOR.



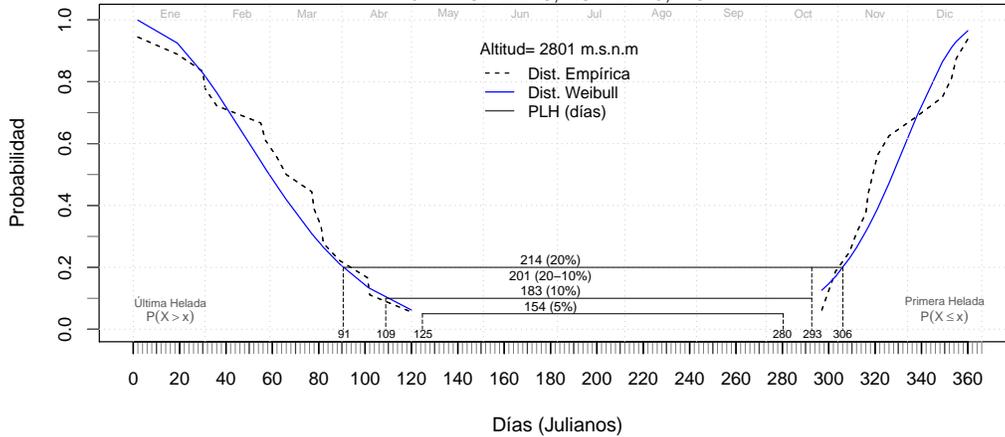
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

17046 HUEYAPAN E-4, TETELA DEL VOLCAN, MOR.



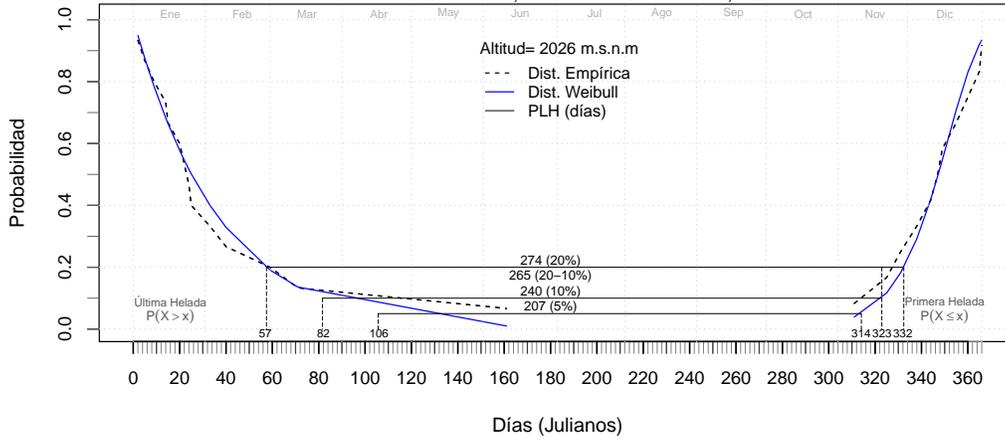
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

17047 HUITZILAC, HUITZILAC, MOR.



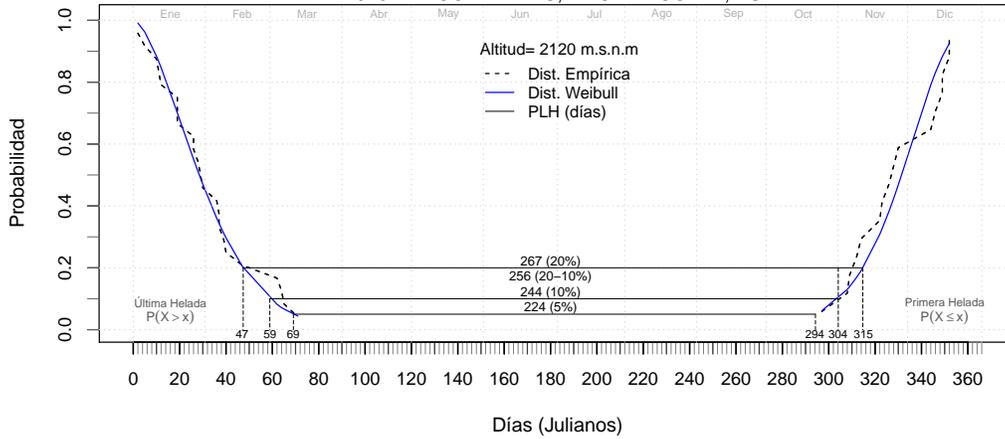
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21007 AHUATEPEC, TECALI DE HERRERA, PUE.



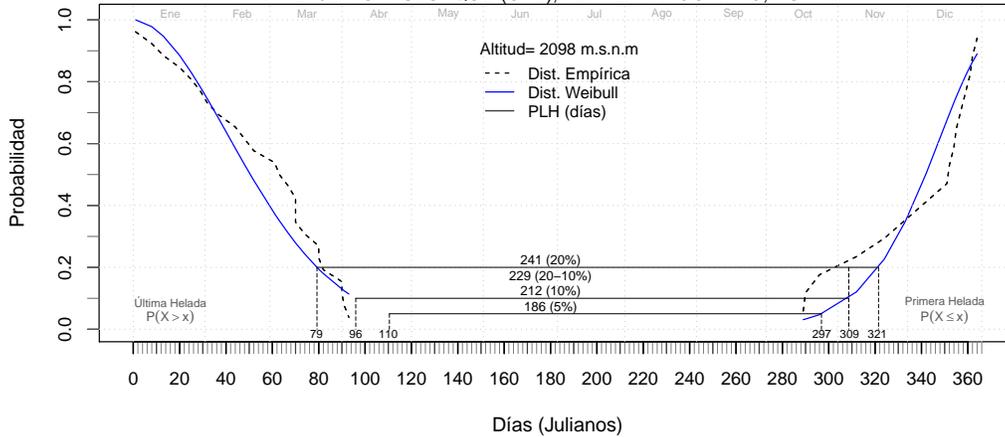
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21016 BALCON DIABLO, TZICATLACOYAN, PUE.



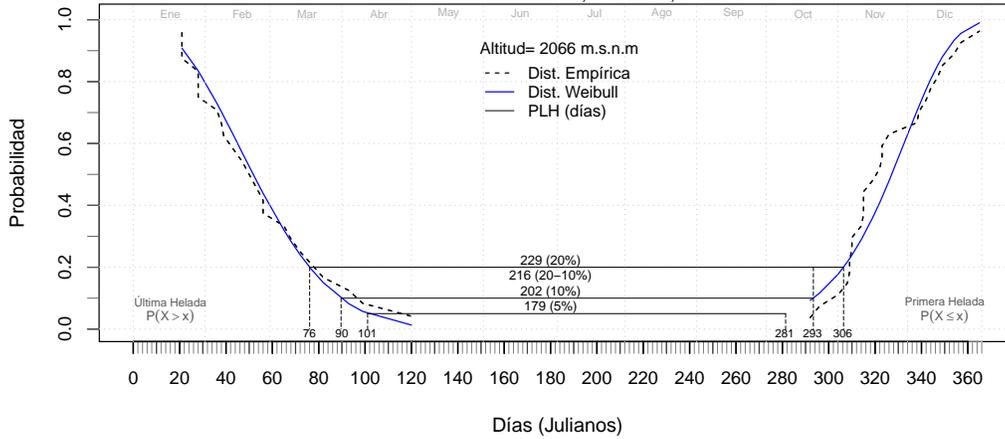
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21021 CAPULUAQUE (CFE), TETELA DE OCAMPO, PUE.



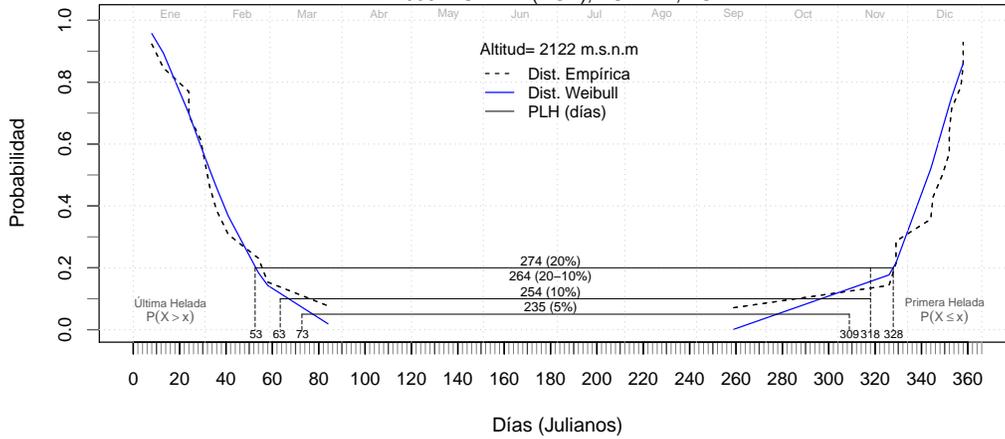
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21034 ECHEVERRIA, PUEBLA, PUE.



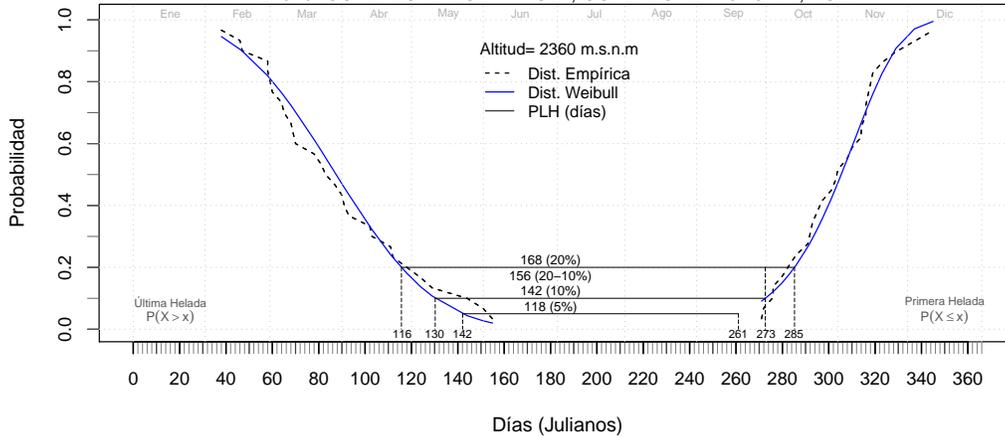
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21035 PUEBLA (DGE), PUEBLA, PUE.



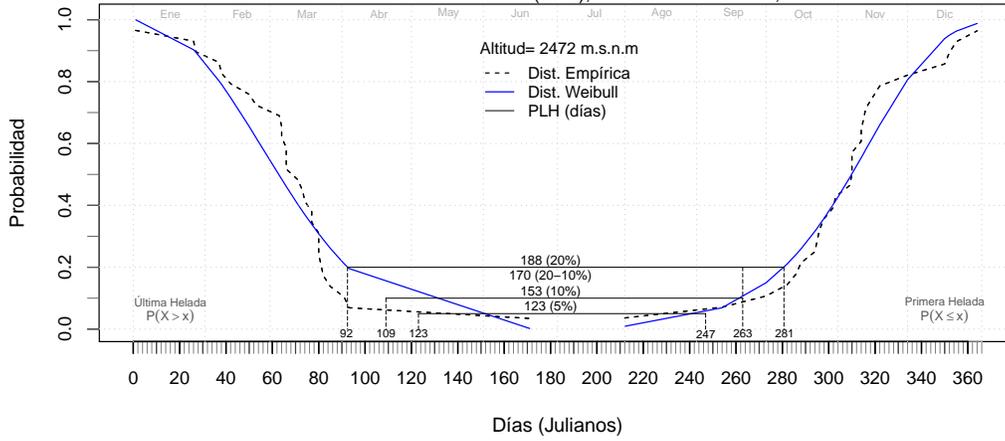
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21040 GUADALUPE BUENAVISTA, GUADALUPE VICTORIA, PUE.



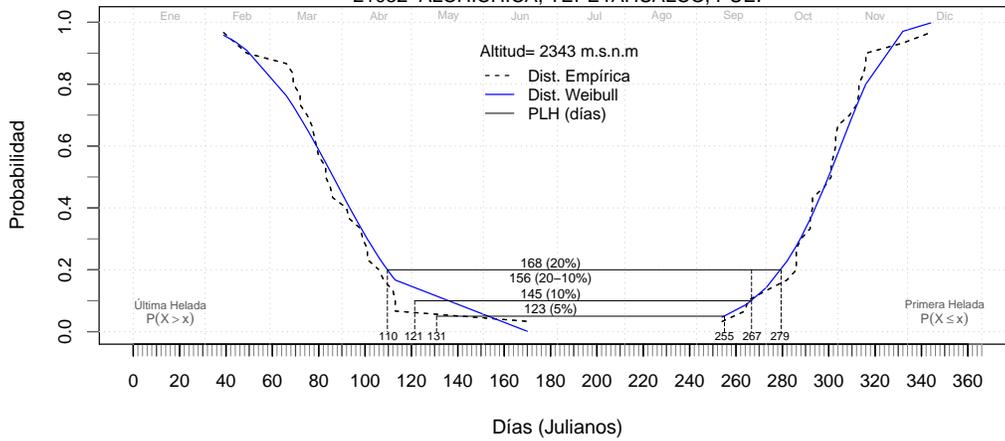
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21047 IXTACAMAXTITLAN (CFE), IXTACAMAXTITLAN, PUE.



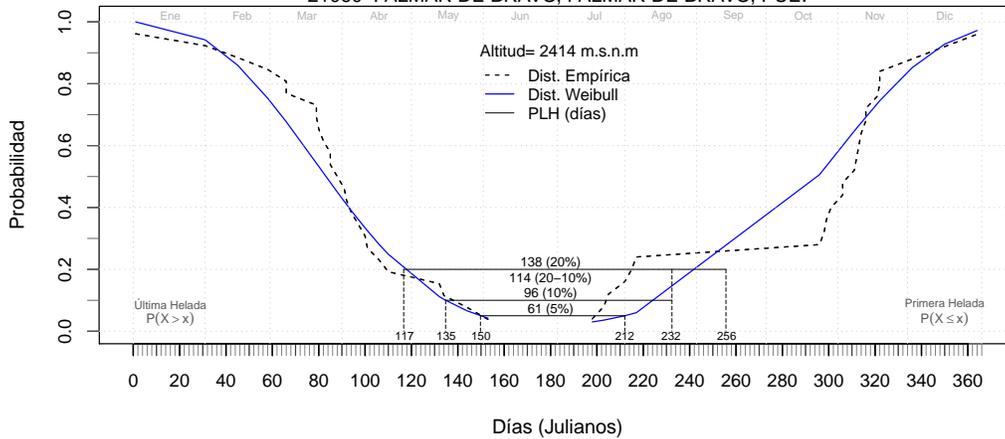
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21052 ALCHICHICA, TEPEYAHUALCO, PUE.



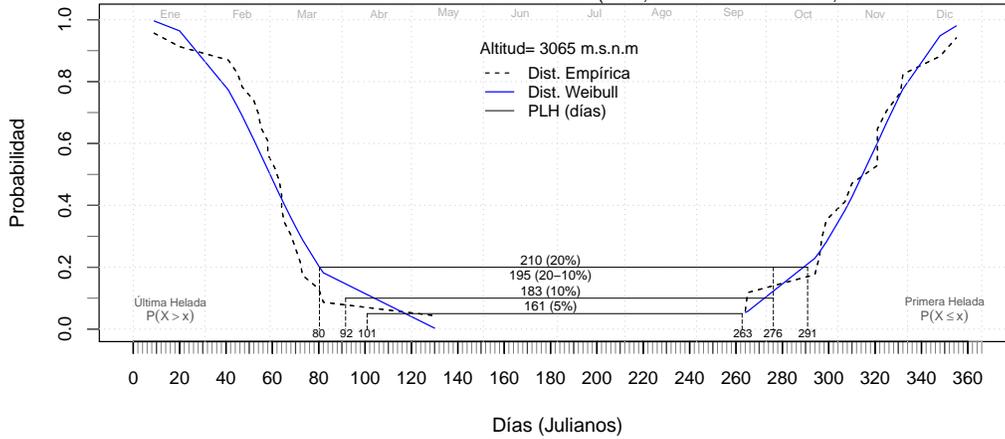
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21060 PALMAR DE BRAVO, PALMAR DE BRAVO, PUE.



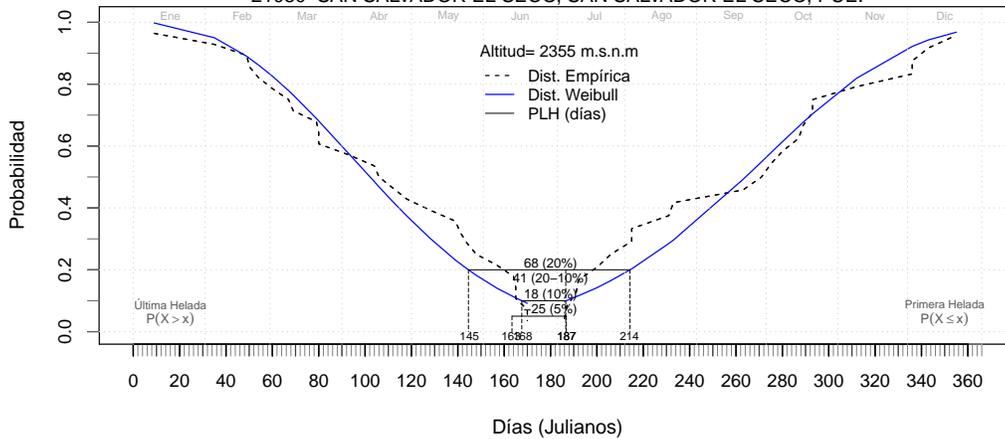
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21069 SAN ANTONIO ARROYO PRIETO (CFE, IXTACAMAXTITLAN, PUE.



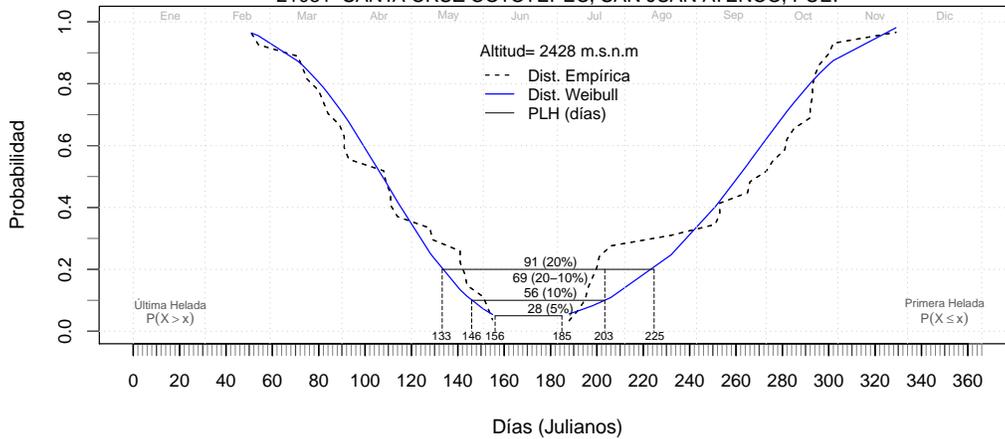
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21080 SAN SALVADOR EL SECO, SAN SALVADOR EL SECO, PUE.



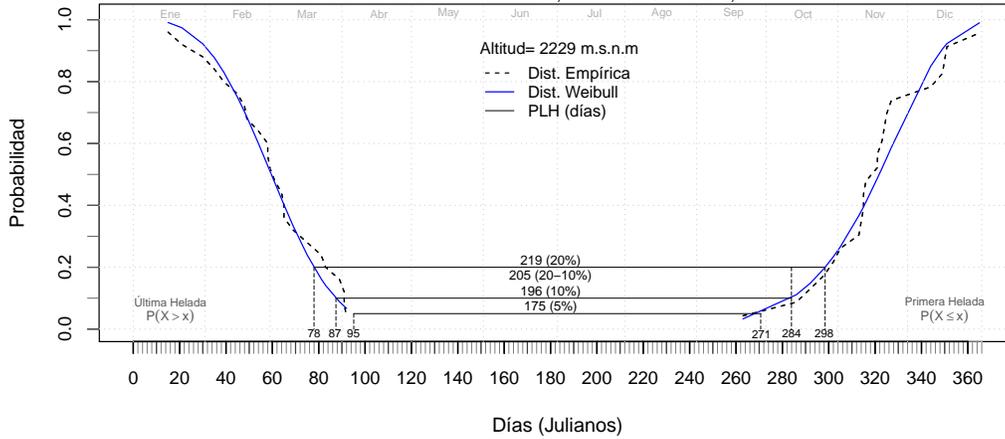
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21081 SANTA CRUZ COYOTEPEC, SAN JUAN ATENCO, PUE.



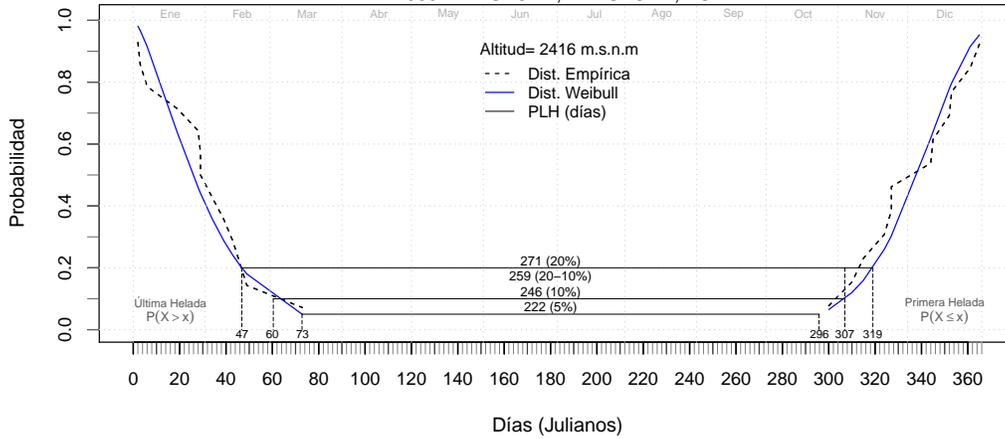
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21082 TECAMACHALCO, TECAMACHALCO, PUE.



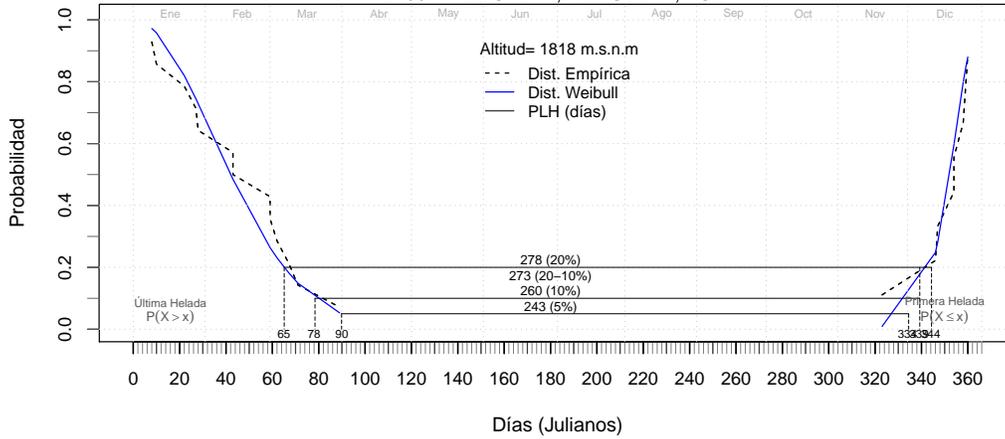
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21083 TEHUACAN, TEHUACAN, PUE.



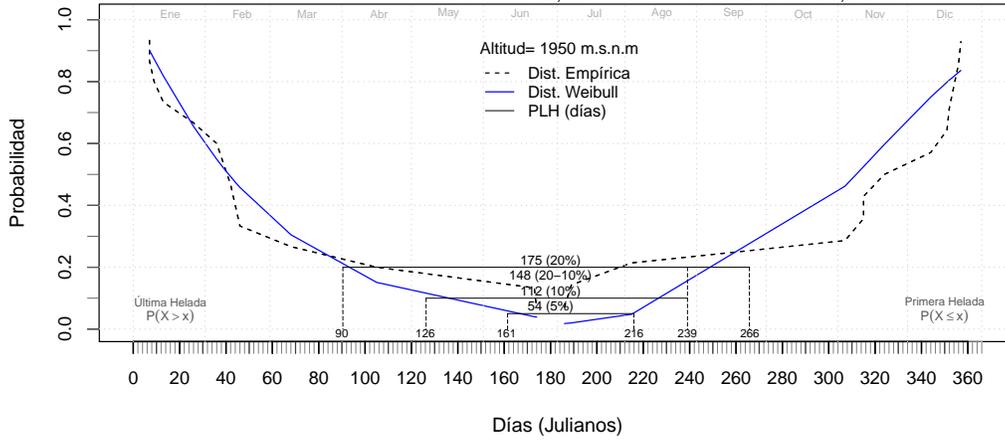
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21091 TEZIUTLAN, TEZIUTLAN, PUE.



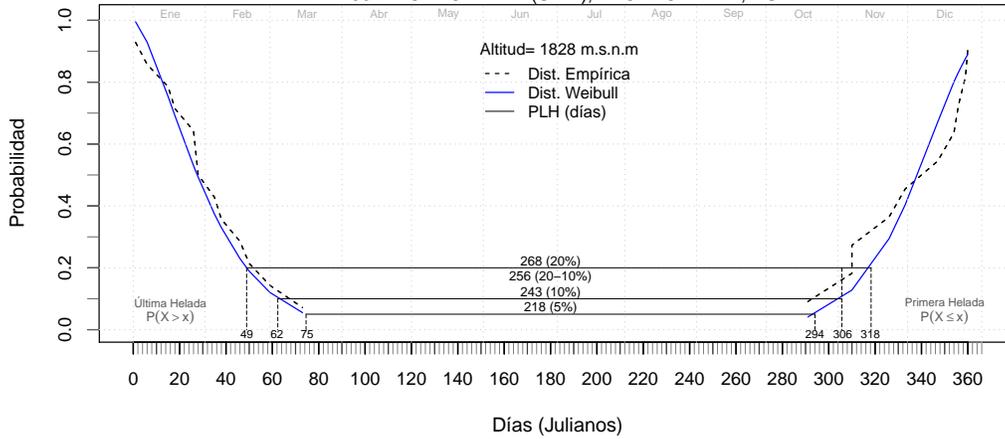
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21102 XOCHITLAN TODOS SANTOS, XOCHITLAN TODOS SANTOS, PUE.



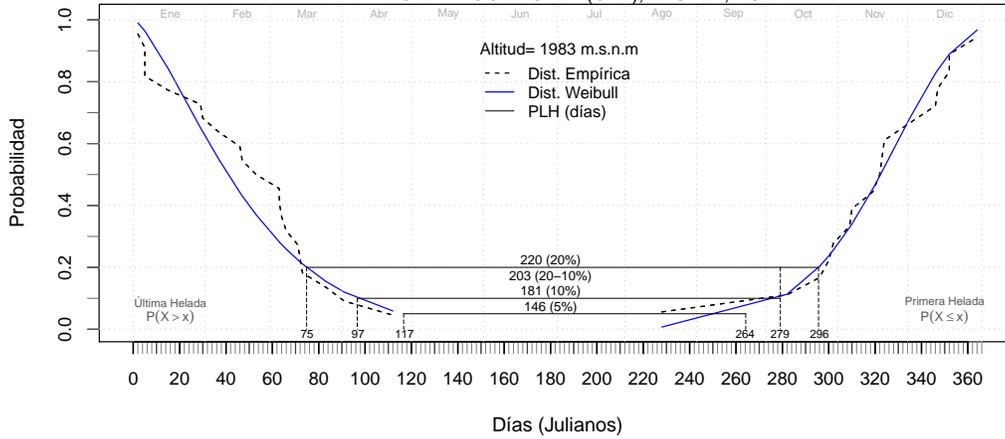
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21103 ZACAPOAXTLA (SMN), ZACAPOAXTLA, PUE.



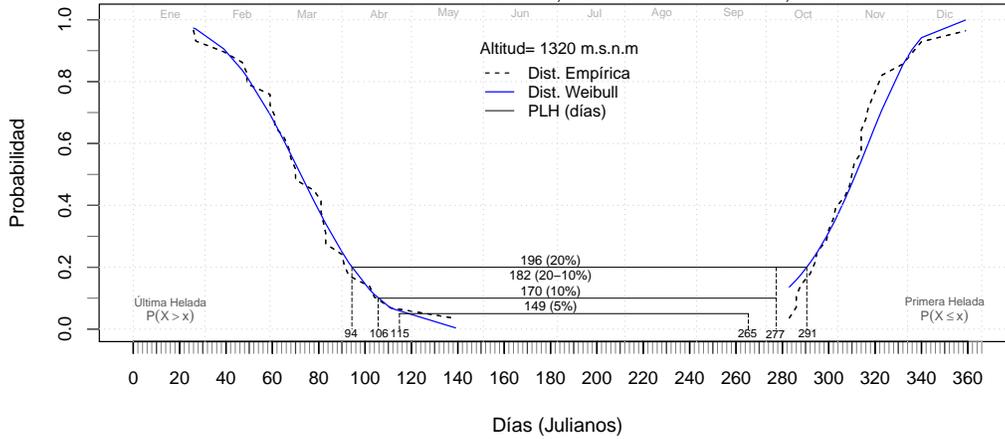
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21111 SANTIAGO ZAUTLA (CFE), ZAUTLA, PUE.



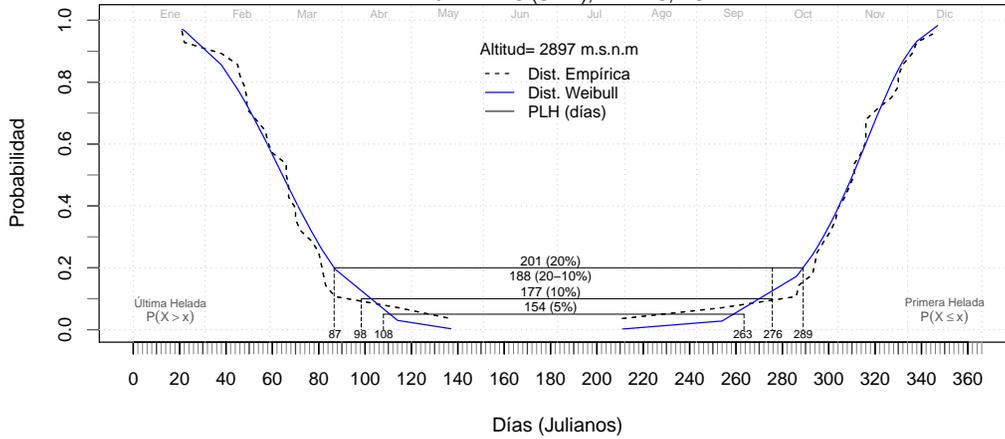
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21117 GUADALUPE VICTORIA, GUADALUPE VICTORIA, PUE.



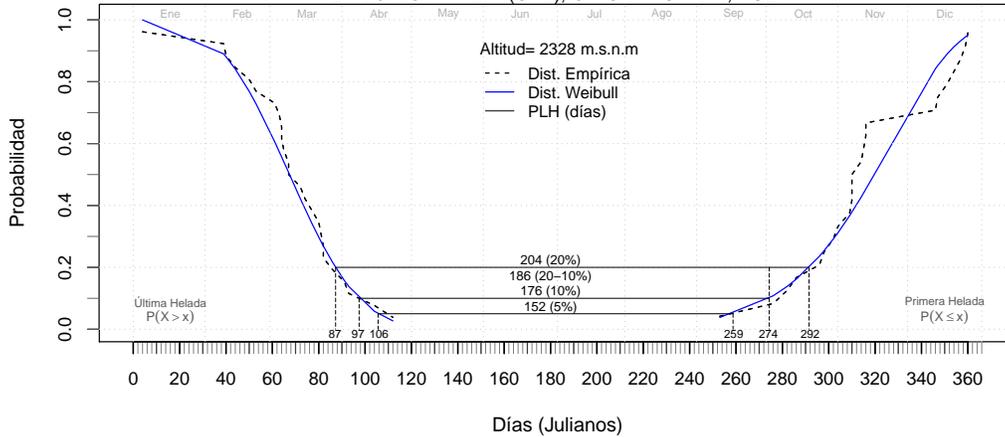
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21119 LIBRES (SMN), LIBRES, PUE.



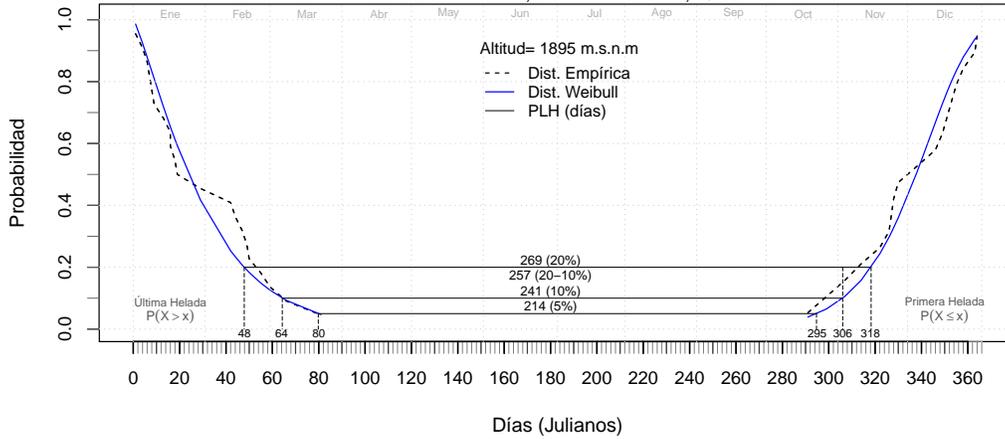
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

21126 LOMA ALTA (CFE), CHIGNAHUAPAN, PUE.



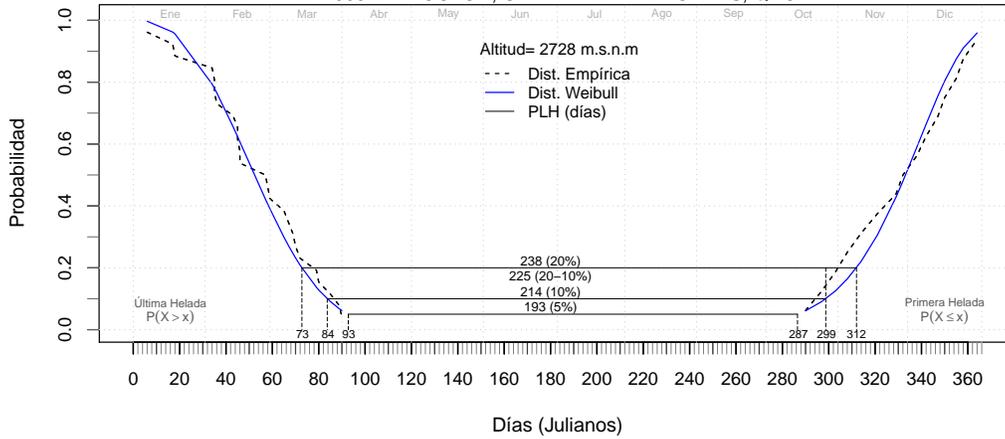
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

22004 EL BATAN, CORREGIDORA, QRO.



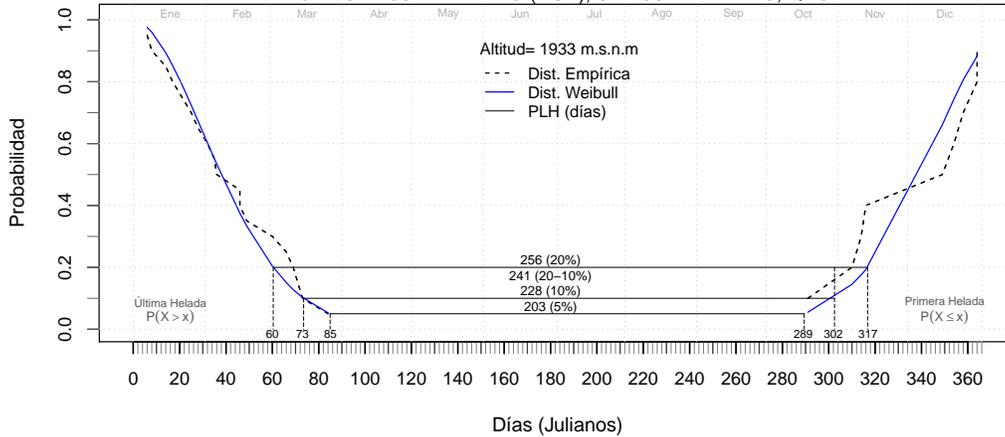
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

22005 EL DOCTOR, CADEREYTA DE MONTES, QRO.



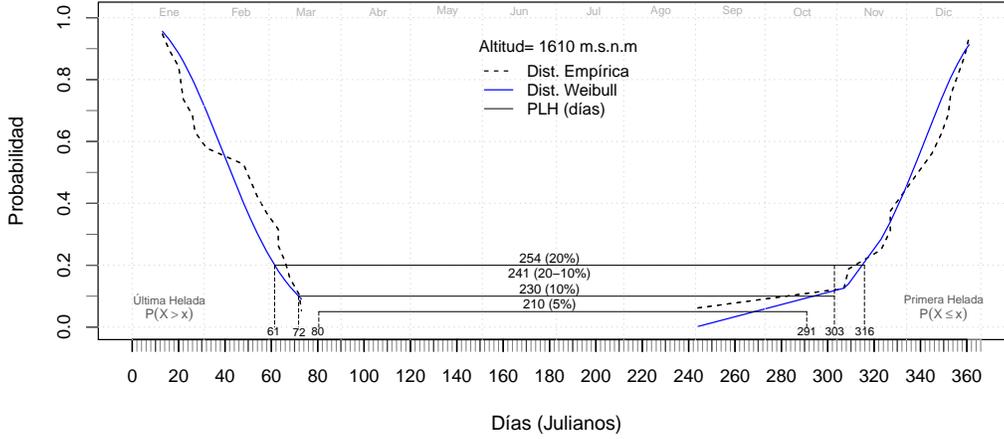
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

22022 SAN JUAN DEL RIO (DGE), SAN JUAN DEL RIO, QRO.



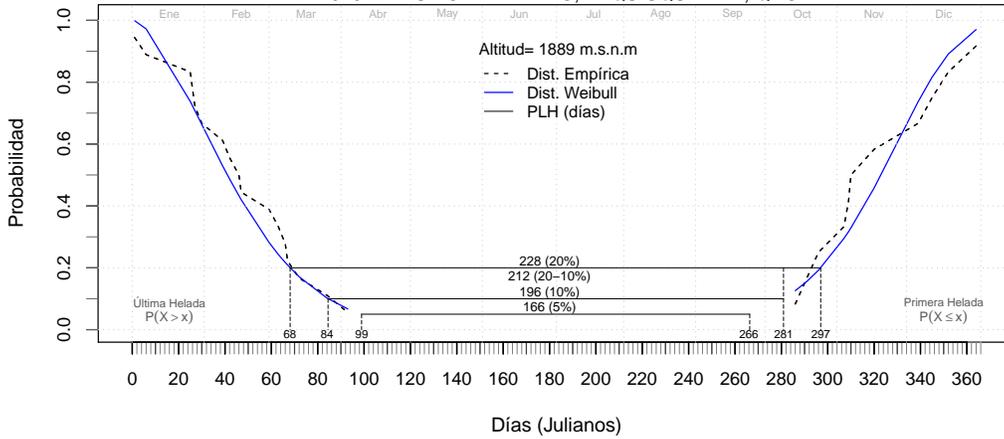
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

22024 TRES LAGUNAS, LANDA DE MATAMOROS, QRO.



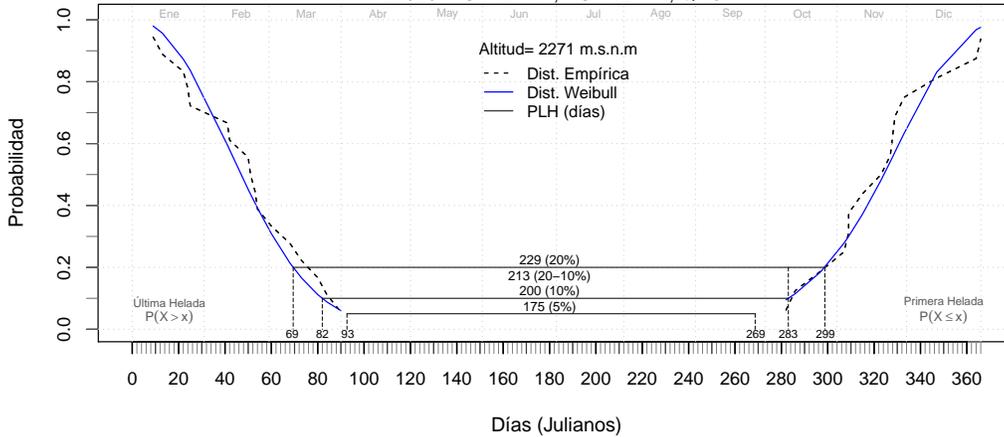
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

22025 PRESA CENTENARIO, TEQUISQUIAPAN, QRO.



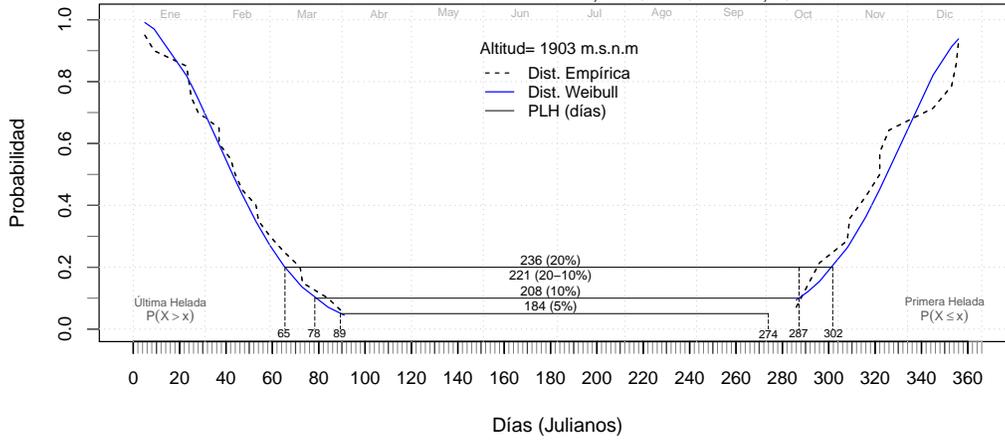
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

22029 HUIMILPAN, HUIMILPAN, QRO.



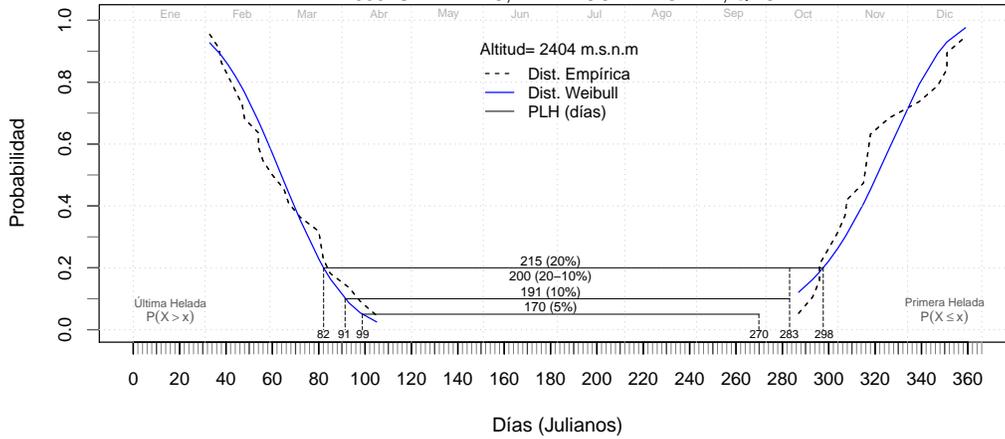
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

22031 PRESA PASO DE TABLAS, TEQUISQUIAPAN, QRO.



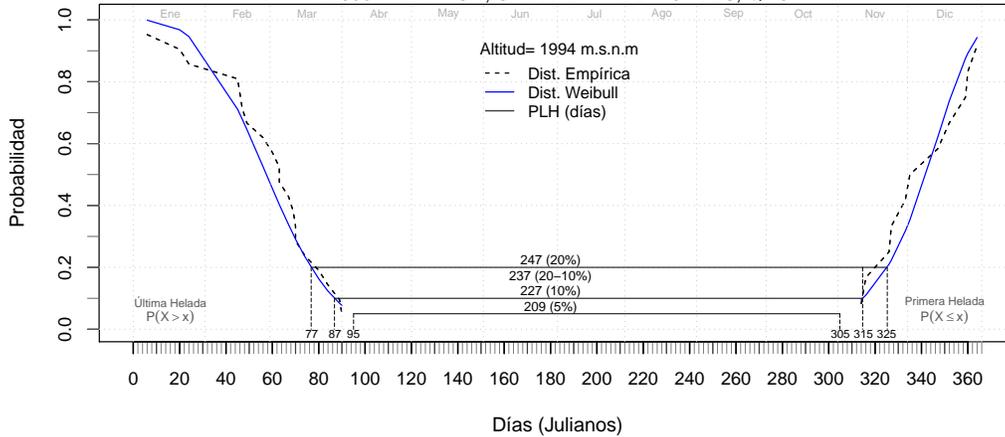
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

22033 SAN PABLO, AMEALCO DE BONFIL, QRO.



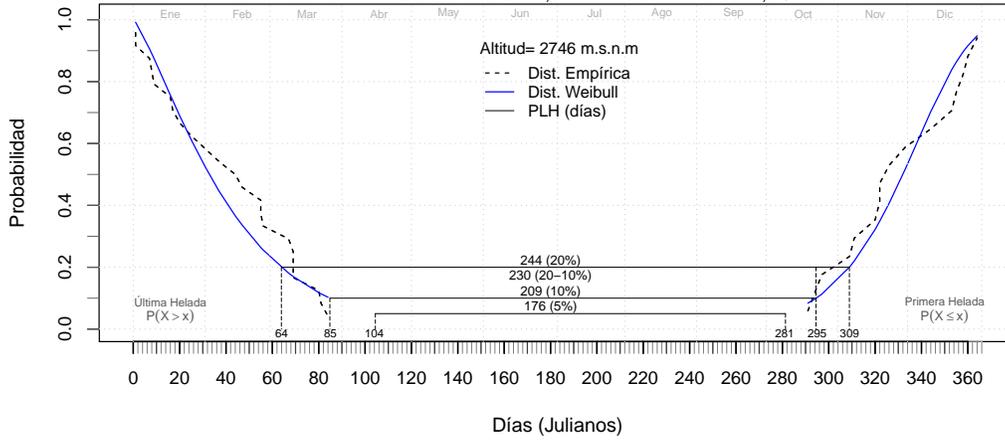
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

22035 VIZARRON, CADEREYTA DE MONTES, QRO.



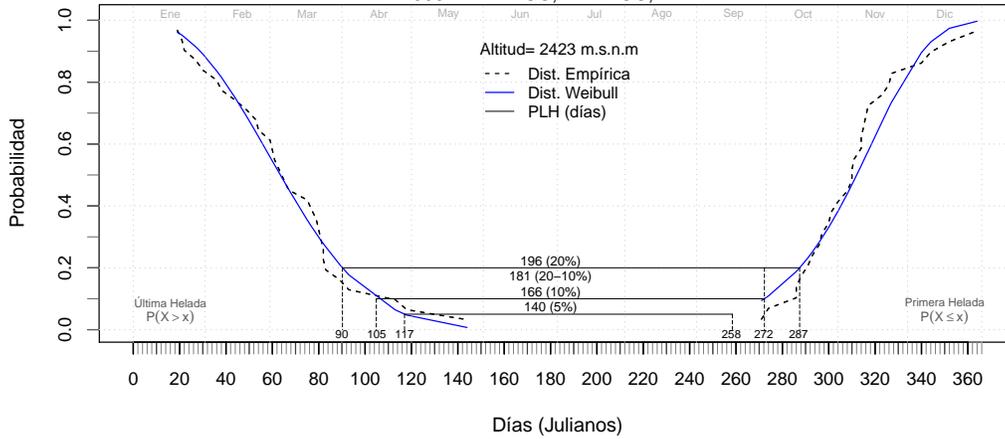
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

22047 PRESA EL CAPULIN, AMEALCO DE BONFIL, QRO.



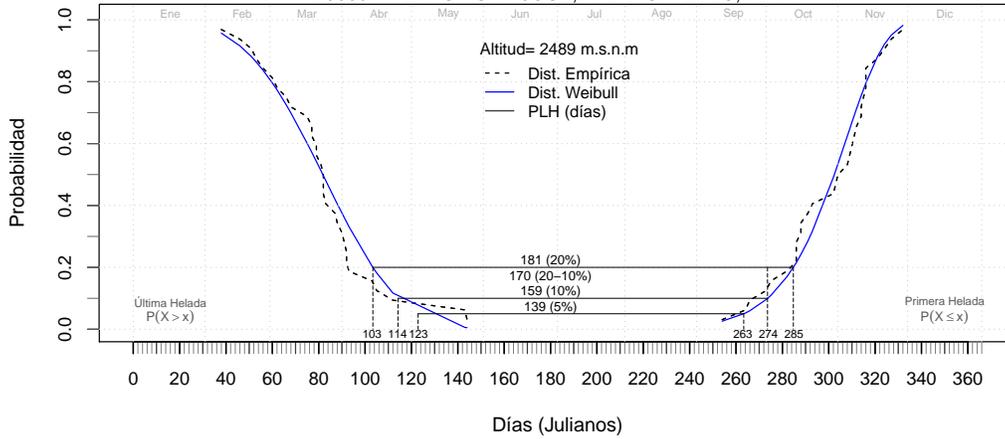
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

29002 APIZACO, APIZACO, TLAX.



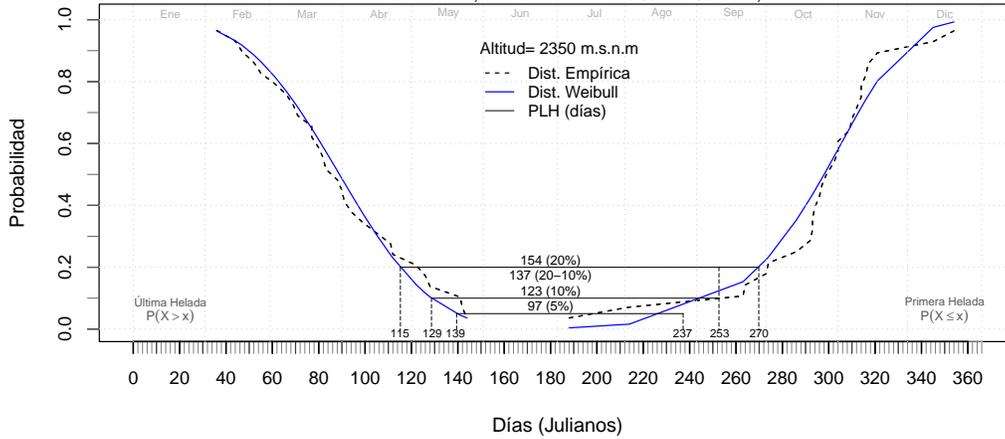
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

29003 ATLANGA SAN JOSE, ATLANGATEPEC, TLAX.



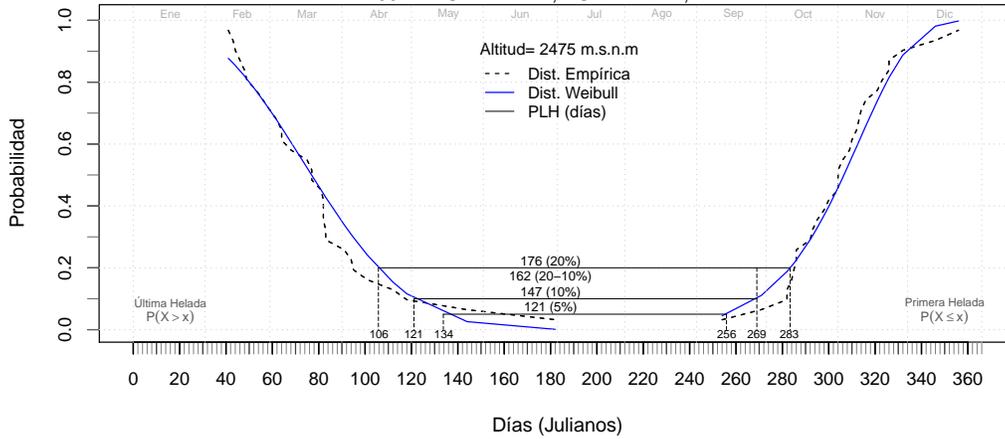
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

29007 EL CARMEN, EL CARMEN TEQUEXQUITLA, TLAX.



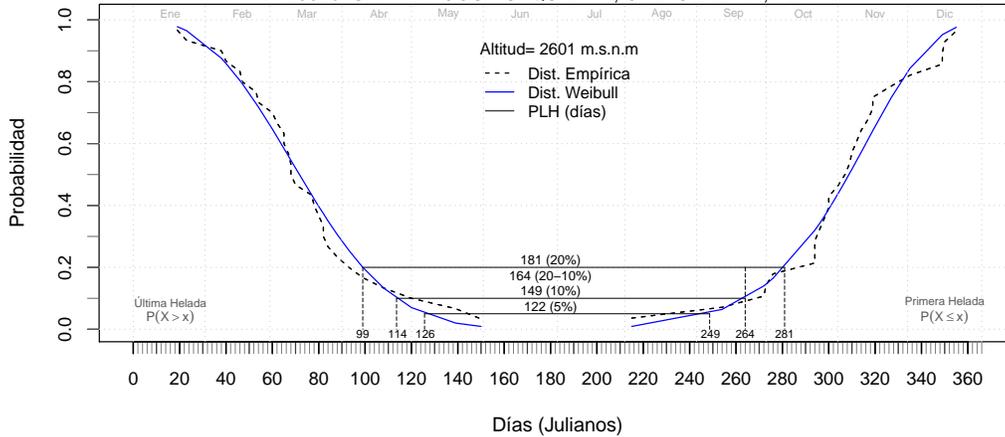
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

29011 HUAMANTLA, HUAMANTLA, TLAX.



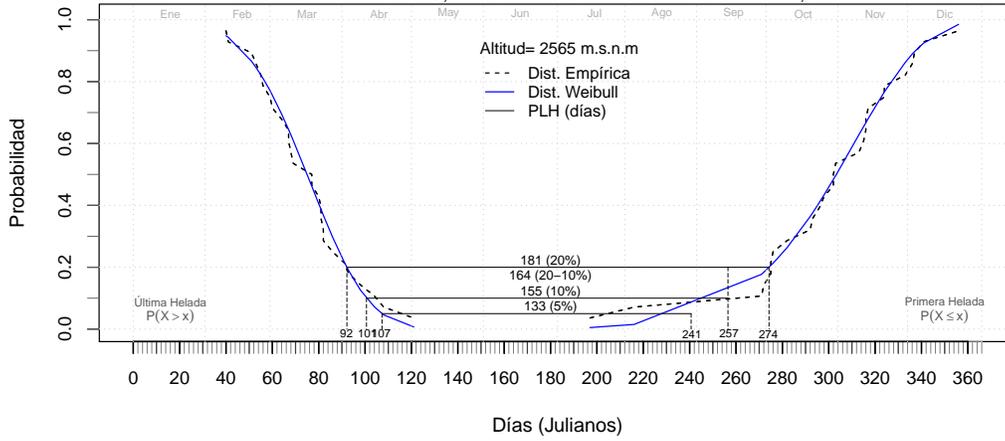
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

29025 SAN MARCOS HUAQUILPAN, CALPULALPAN, TLAX.



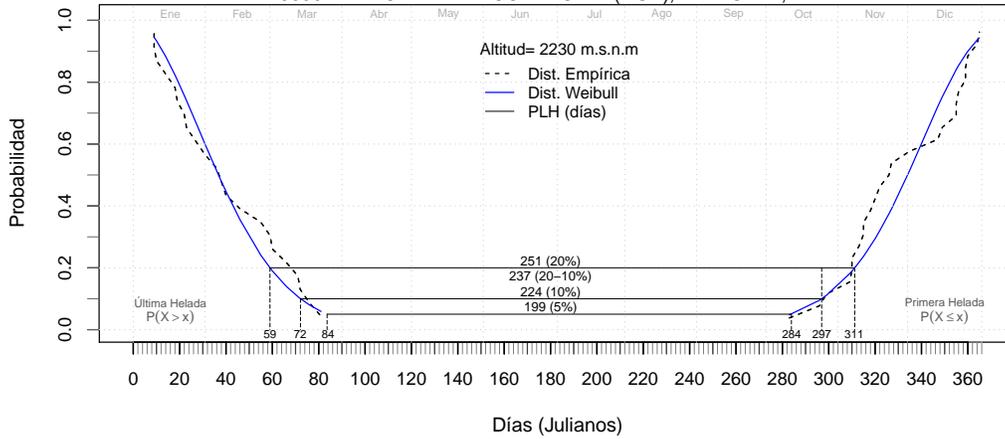
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

29026 ZITLALTEPEC, ZITLALTEPEC DE TRINIDAD SANCHE, TLAX.



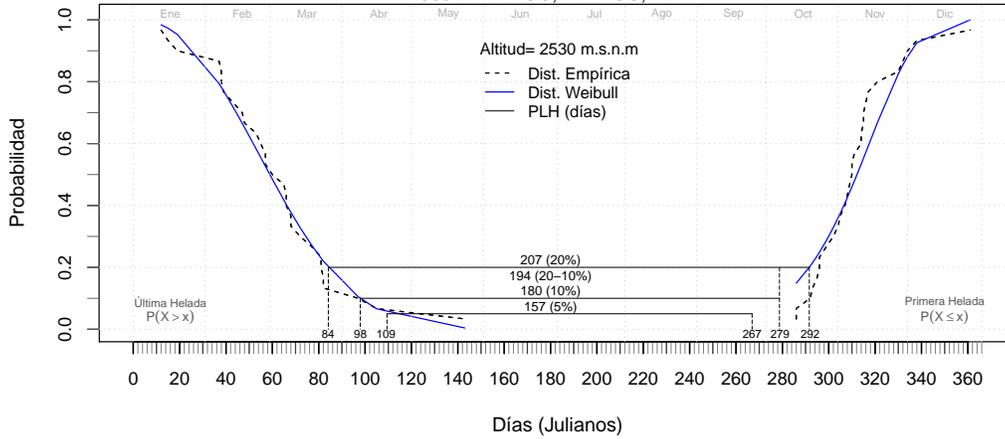
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

29030 TLAXCALA DE XICONTECATL (DGE), TLAXCALA, TLAX.



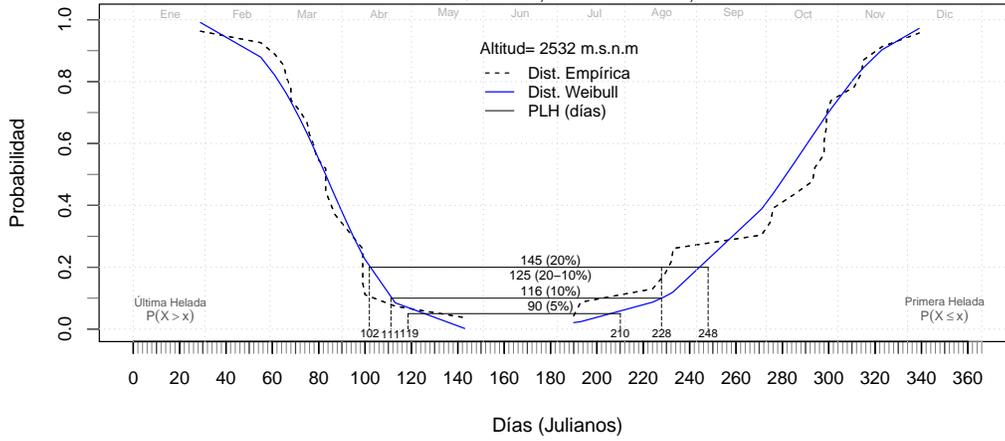
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

29032 TLAXCO, TLAXCO, TLAX.



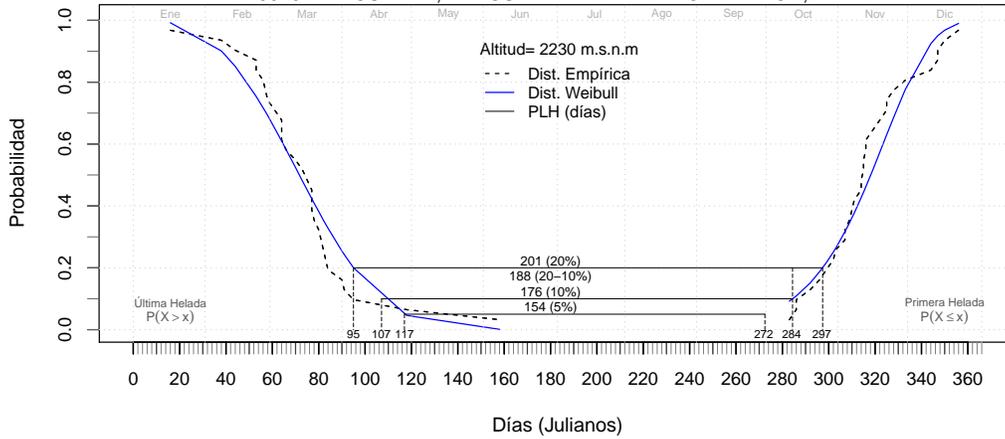
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

29034 ZOQUIAPAN, CALPULALPAN, TLAX.



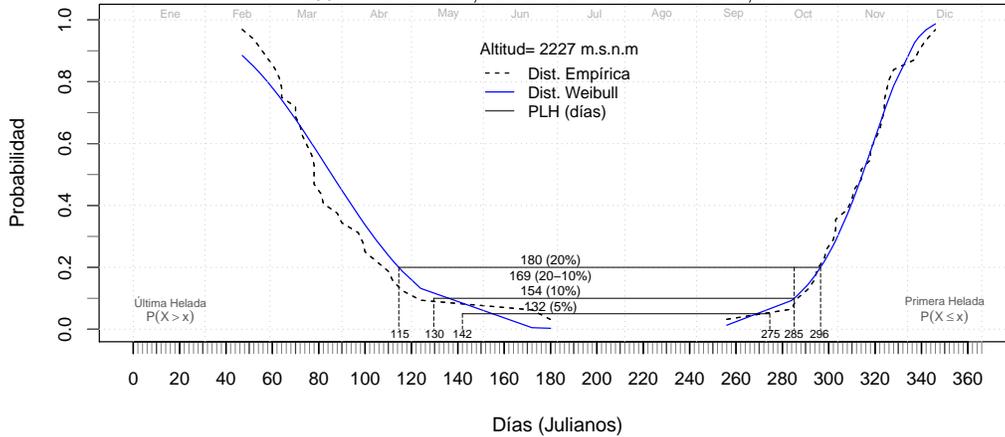
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

29040 IXTACUIXTLA, IXTACUIXTLA DE MARIANO MATAMOR, TLAX.



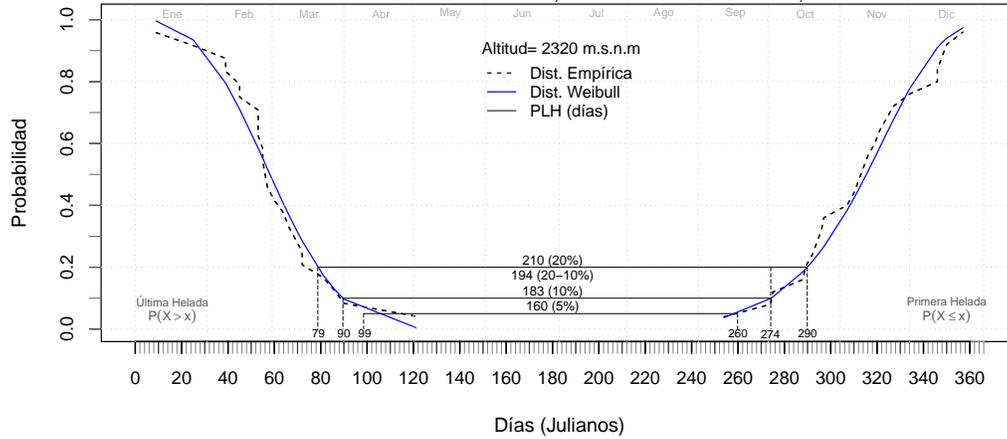
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

29041 TEPETITLA, TEPETITLA DE LARDIZABAL, TLAX.



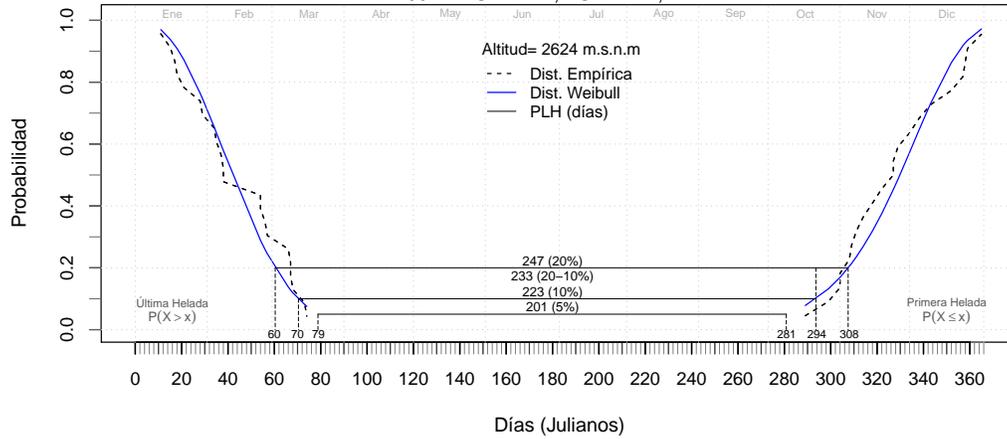
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

29042 AMAXAC DE GUERRERO, AMAXAC DE GUERRERO, TLAX.



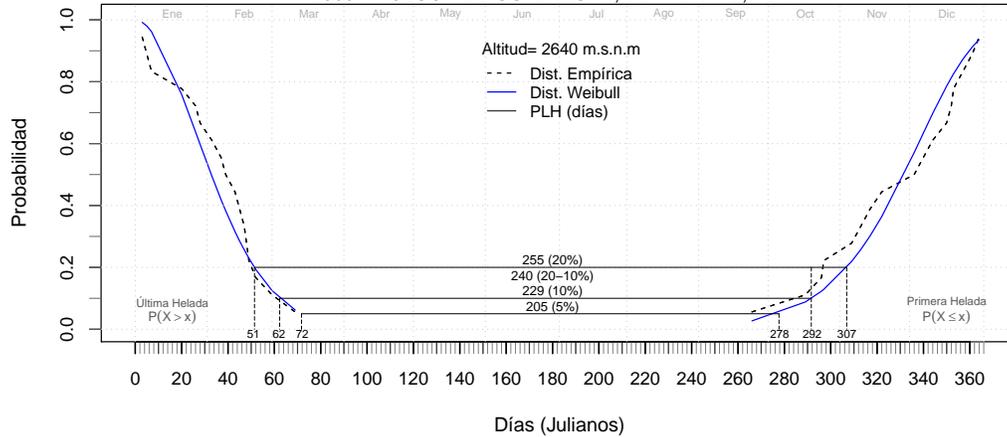
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

29047 ESPAÑITA, ESPAÑITA, TLAX.



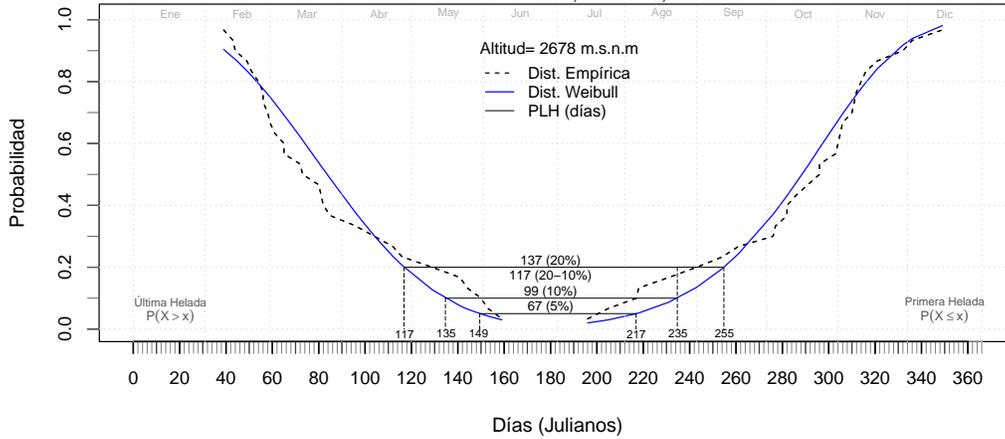
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

29051 TOLUCA DE GUADALUPE, TERRENATE, TLAX.



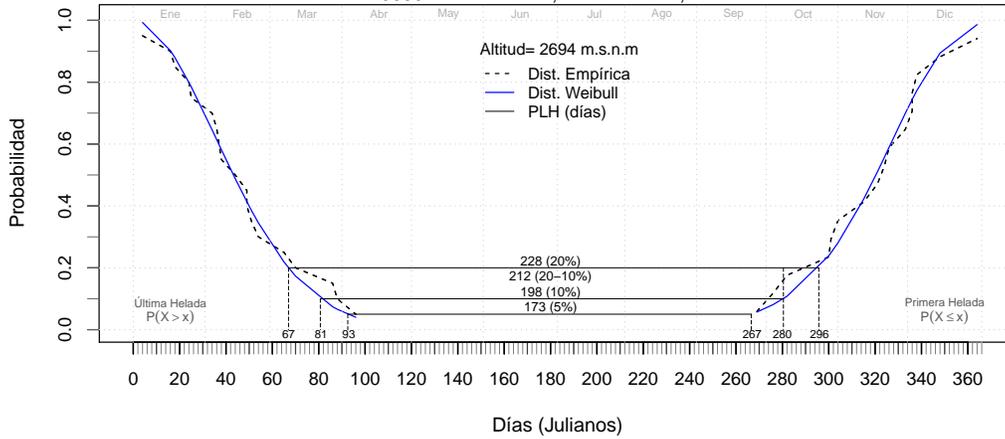
**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

29052 EL ROSARIO, TLAXCO, TLAX.



**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

29053 TERRENATE, TERRENATE, TLAX.



**Probabilidad de Ocurrencia de Heladas**

29151 ALTZAYANCA, ALTZAYANCA, TLAX.

