

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**CONTRIBUCIÓN A LA DETERMINACIÓN DEL RÉGIMEN
AGROCLIMÁTICO DE HELADAS DEL URUGUAY**

por

Leticia DE SOUZA FORMOSO

**TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniera Agrónoma**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2015**

Tesis aprobada por:

Director: -----
Ing. Agr. Juan Pablo Chiara

Ing. Agr. Carolina Munka

Ing. Agr. Oscar Bentancur

Ing. Agr. Celmira Saravia

Fecha: 18 de diciembre de 2015

Autor: -----
Leticia de Souza Formoso

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los profesores Juan Pablo Chiara, Carolina Munka, Oscar Bentancur, Celmira Saravia, Mario Caffera y Mario Michelazzo. También a María del Carmen y Diego del INUMET y a Guadalupe del INIA.

Y agradezco a mi familia y a todas las personas que me motivaron para que este trabajo se lleve a cabo.

TABLA DE CONTENIDO

| | Página |
|---|--------|
| PÁGINA DE APROBACIÓN..... | II |
| AGRADECIMIENTOS | III |
| LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES | VII |
| | |
| 1. <u>INTRODUCCIÓN</u> | 1 |
| | |
| 2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> | 2 |
| 2.1. HELADAS: DEFINICIONES Y CLASIFICACIÓN | 2 |
| 2.2. SUSCEPTIBILIDAD DE LAS PLANTAS A LAS BAJAS TEMPERATURAS..... | 6 |
| 2.2.1. <u>El daño producido por las heladas en las plantas: causas fisiológicas, tipos de daño y síntomas a nivel de planta</u> | 6 |
| 2.2.2. <u>Características propias de las plantas que aumentan o disminuyen su susceptibilidad a las heladas</u> | 7 |
| 2.2.3. <u>Resistencia a las heladas de las especies forestales</u> | 7 |
| 2.3. FACTORES AMBIENTALES QUE DETERMINAN LA OCURRENCIA DE HELADAS | 11 |
| 2.4. RÉGIMEN AGROCLIMÁTICO DE HELADAS..... | 18 |
| 2.4.1. <u>Período medio con heladas y período medio libre de heladas</u> | 19 |
| 2.4.2. <u>Probabilidad de ocurrencia de primeras y últimas heladas</u> | 19 |
| 2.4.3. <u>ICK de heladas otoñales y primaverales</u> | 20 |
| 2.4.4. <u>Período de peligrosidad de heladas otoñales y primaverales</u> .. | 21 |
| 2.5. ANTECEDENTES DE ESTUDIOS SOBRE HELADAS EN URUGUAY | 22 |
| 2.6. EVENTO JUNIO 2012..... | 25 |
| | |
| 3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> | 29 |
| 3.1. RECOPIACIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS | 29 |
| 3.2. SELECCIÓN PRELIMINAR DE LOS DATOS A UTILIZAR | 29 |
| 3.3. CONTROL DE CALIDAD DE LOS DATOS..... | 32 |
| 3.4. ANÁLISIS DE LOS DATOS..... | 36 |
| 3.4.1. <u>Selección de umbrales de temperatura mínima</u> | 36 |
| 3.4.2. <u>Cálculos y presentación de los resultados</u> | 37 |

| | |
|---|-----|
| 3.4.3. <u>Cálculo de probabilidades por el método de frecuencias acumuladas</u> | 41 |
| 3.4.4. <u>Prueba de normalidad de fecha de ocurrencia de primeras y últimas heladas</u> | 42 |
| 3.4.5. <u>Cálculo de probabilidades asumiendo una distribución normal</u> | 43 |
| 3.4.6. <u>Análisis descriptivo del evento junio 2012</u> | 46 |
| 4. <u>RESULTADOS</u> | 47 |
| 4.1. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA TEMPERATURA | 47 |
| 4.2. RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS MEDIOS ESTIMADOS DEL RÉGIMEN AGROCLIMÁTICO DE HELADAS | 49 |
| 4.3. RESULTADOS DE LOS VALORES EXTREMOS DEL RÉGIMEN AGROCLIMÁTICO DE HELADAS | 65 |
| 4.4. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA PELIGROSIDAD DE LAS HELADAS OTOÑALES Y PRIMAVERALES | 70 |
| 4.5. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE NORMALIDAD | 73 |
| 4.5.1. <u>Resultados de las pruebas de normalidad para primeras heladas</u> | 75 |
| 4.5.2. <u>Resultados de las pruebas de normalidad para últimas heladas</u> | 82 |
| 4.6. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL CÁLCULO DE PROBABILIDADES ASUMIENDO UNA DISTRIBUCIÓN NORMAL..... | 87 |
| 4.7. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DESCRIPTIVO DEL EVENTO JUNIO 2012 | 88 |
| 5. <u>DISCUSIÓN</u> | 105 |
| 5.1. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA TEMPERATURA..... | 105 |
| 5.2. PARÁMETROS MEDIOS ESTIMADOS DEL RÉGIMEN AGROCLIMÁTICO DE HELADAS | 105 |
| 5.3. VALORES EXTREMOS DEL RÉGIMEN AGROCLIMÁTICO DE HELADAS | 108 |
| 5.4. CARACTERIZACIÓN DE LA PELIGROSIDAD DE LAS HELADAS OTOÑALES Y PRIMAVERALES..... | 109 |

| | |
|---|-----|
| 5.5. PRUEBAS DE NORMALIDAD Y CÁLCULOS DE PROBABILIDAD ASUMIENDO UNA DISTRIBUCIÓN NORMAL..... | 110 |
| 5.6. ANÁLISIS DESCRIPTIVO DEL EVENTO JUNIO 2012 | 111 |
| 6. <u>CONCLUSIONES</u> | 114 |
| 7. <u>RESUMEN</u> | 115 |
| 8. <u>SUMMARY</u> | 116 |
| 9. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> | 117 |
| 10. <u>ANEXOS</u> | 121 |

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

| Cuadro No. | Página |
|---|--------|
| 1. Comparación entre condiciones en heladas por advección y por radiación | 5 |
| 2. Características climáticas de las áreas de distribución natural de diferentes especies de eucaliptos..... | 9 |
| 3. TL50% de diferentes especies de eucaliptos, sometidas a dos períodos de endurecimiento, y diferencias con test de Tukey ($p < 0,05$)..... | 11 |
| 4. Riesgo de heladas relativo a diferentes formas topográficas | 16 |
| 5. Parámetros estimados que caracterizan las heladas en Uruguay | 22 |
| 6. Coordenadas de las estaciones meteorológicas (grados sexagesimales, decimales) y altitud (m s.n.m)..... | 30 |
| 7. Fechas de comienzo y fin de series de temperatura mínima diaria y los períodos con datos faltantes..... | 32 |
| 8. Cuadro explicativo con temperaturas críticas de <i>E. grandis</i> y <i>E. globulus</i> a diferentes alturas: en la planta (a 0,05 m), en casilla (a 1,5 m) y a 0,5 m del suelo | 37 |
| 9. Resultados de la caracterización general de la temperatura de cada estación meteorológica: temperatura máxima media (TXM), temperatura mínima media (TNM), temperatura media (TM), temperatura máxima media de enero (TXM enero), temperatura mínima media de julio (TNM julio), temperatura mínima anual media (TNAM) y temperatura mínima absoluta histórica (TNabs.Histo.)..... | 48 |
| 10. Resultados de los parámetros medios estimados del régimen agroclimático de heladas para cada estación, usando el umbral $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$: porcentaje de años con heladas (%ACh), fecha media de primera helada (FMPH) y su desvío estándar (DE), fecha media de última helada (FMUH) y su desvío estándar (DE), período medio con heladas (PMCH) y período medio libre de heladas (MNLH) | 52 |
| 11. Resultados de los parámetros medios estimados del régimen agroclimático de heladas para cada estación, usando el umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$: porcentaje de años con heladas (%ACh), fecha media de primera helada (FMPH) y su desvío estándar (DE), fecha media de última helada (FMUH) y su desvío estándar (DE), período medio con heladas (PMCH) y período medio libre de heladas (MNLH) | 53 |

| | |
|--|----|
| 12. Resultados de los parámetros medios estimados del régimen agroclimático de heladas para cada estación, usando el umbral 0 °C: porcentaje de años con heladas (%ACh), fecha media de primera helada (FMPH) y su desvío estándar (DE), fecha media de última helada (FMUH) y su desvío estándar (DE), período medio con heladas (PMCH) y período medio libre de heladas (MNLH) | 54 |
| 13. Resultados de los parámetros medios estimados del régimen agroclimático de heladas para cada estación, usando el umbral 2 °C: porcentaje de años con heladas (%ACh), fecha media de primera helada (FMPH) y su desvío estándar (DE), fecha media de última helada (FMUH) y su desvío estándar (DE), período medio con heladas (PMCH) y período medio libre de heladas (MNLH) | 55 |
| 14. Resultados de los parámetros medios estimados del régimen agroclimático de heladas para cada estación, usando el umbral 4 °C: porcentaje de años con heladas (%ACh), fecha media de primera helada (FMPH) y su desvío estándar (DE), fecha media de última helada (FMUH) y su desvío estándar (DE), período medio con heladas (PMCH) y período medio libre de heladas (MNLH) | 56 |
| 15. Resultados de fechas extremas de ocurrencia de primera y última helada y del los períodos extremos con y libre de heladas para cada estación meteorológica, usando el umbral -4 °C: fecha extrema de primera helada (FEPH), fecha extrema de última helada (FEUH), período extremos con heladas (PECH) y período extremo libre de heladas (PELH) | 66 |
| 16. Resultados de fechas extremas de ocurrencia de primera y última helada y del los períodos extremos con y libre de heladas para cada estación meteorológica, usando el umbral -2 °C: fecha extrema de primera helada (FEPH), fecha extrema de última helada (FEUH), período extremos con heladas (PECH) y período extremo libre de heladas (PELH) | 67 |
| 17. Resultados de fechas extremas de ocurrencia de primera y última helada y del los períodos extremos con y libre de heladas para cada estación meteorológica, usando el umbral 0 °C: fecha extrema de primera helada (FEPH), fecha extrema de última helada (FEUH), período extremos con heladas (PECH) y período extremo libre de heladas (PELH) | 68 |

| | |
|--|----|
| 18. Resultados de fechas extremas de ocurrencia de primera y última helada y del los períodos extremos con y libre de heladas para cada estación meteorológica, usando el umbral 2 °C: fecha extrema de primera helada (FEPH), fecha extrema de última helada (FEUH), período extremos con heladas (PECH) y período extremo libre de heladas (PELH) | 69 |
| 19. Resultados de fechas extremas de ocurrencia de primera y última helada y del los períodos extremos con y libre de heladas para cada estación meteorológica, usando el umbral 4 °C: fecha extrema de primera helada (FEPH), fecha extrema de última helada (FEUH), período extremos con heladas (PECH) y período extremo libre de heladas (PELH) | 70 |
| 20. Fecha hasta la que ocurren heladas con una 20% de probabilidad, y fecha a partir de la cual ocurren heladas con un 20% de probabilidad, calculado por el método empírico, para cada estación meteorológica | 72 |
| 21. Resultados de los parámetros estimados para caracterizar la peligrosidad de las heladas otoñales y primaverales en cada estación meteorológica: índice crikindinoscópico de primera heladas (ICK P), índice crikindinoscópico de últimas heladas (ICK U), fecha media de primeras temp. de 10 °C o menores (FMP10), fecha media de últimas temp. de 10 °C o menores (FMU10), período de peligrosidad de primeras heladas (Ppeli.P) y período de peligrosidad de últimas heladas (Ppeli.U)..... | 73 |
| 22. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Artigas | 75 |
| 23. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Carrasco..... | 77 |
| 24. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Melo | 77 |
| 25. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), | |

| | |
|--|----|
| media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Mercedes..... | 77 |
| 26. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Paso de los Toros | 78 |
| 27. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Paysandú | 78 |
| 28. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Rivera | 78 |
| 29. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Rocha..... | 79 |
| 30. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Salto | 79 |
| 31. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Sayago | 80 |
| 32. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación INIA Treinta y Tres | 80 |
| 33. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación INIA Las Brujas | 81 |
| 34. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), | |

| | |
|--|----|
| media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación INIA La Estanzuela..... | 81 |
| 35. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación INIA Salto Grande | 81 |
| 36. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Artigas | 82 |
| 37. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Carrasco..... | 83 |
| 38. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Melo | 83 |
| 39. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Mercedes..... | 83 |
| 40. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Paso de los Toros | 84 |
| 41. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Paysandú | 84 |
| 42. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Rivera | 84 |
| 43. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), | |

| | |
|---|----|
| media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Rocha..... | 85 |
| 44. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Salto..... | 85 |
| 45. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Sayago..... | 85 |
| 46. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación INIA Treinta y Tres..... | 86 |
| 47. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación INIA Las Brujas..... | 86 |
| 48. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación INIA La Estanzuela..... | 86 |
| 49. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación INIA Salto Grande..... | 87 |
| 50. Fechas hasta la cual ocurren heladas en Melo asumiendo probabilidades totales (Pt) de 0,1; 0,2; 0,33 y 0,5 para los todos umbrales..... | 88 |
| 51. Fechas a partir de la cual ocurren heladas en Melo asumiendo probabilidades totales (Pt) de 0,1; 0,2; 0,33 y 0,5 para los todos umbrales..... | 88 |
| 52. Descripción del evento junio 2012 en cuanto a temperatura máxima diaria (T máx.) y temperatura mínima diaria (T mín.); y datos de fecha media de primera helada (FMPH) y temperatura mínima absoluta histórica (TNabs.Histo.), para las estaciones meteorológicas del sur del país..... | 90 |

| | |
|---|----|
| 53. Descripción del evento junio 2012 en cuanto a temperatura máxima diaria (T máx.) y temperatura mínima diaria (T mín.); y datos de fecha media de primera helada (FMPH) y temperatura mínima absoluta histórica (TNabs.Histo.), para las estaciones meteorológicas del litoral oeste y centro del país | 91 |
| 54. Descripción del evento junio 2012 en cuanto a temperatura máxima diaria (T máx.) y temperatura mínima diaria (T mín.); y datos de fecha media de primera helada (FMPH) y temperatura mínima absoluta histórica (TNabs.Histo.), para las estaciones meteorológicas del noreste y norte del país | 92 |
| 55. Días seguidos con heladas durante el evento 2012 (Hds2012), cantidad de años en los que se han repetido (Años \geq Hds2012) y cantidad de eventos similares (Eventos \geq Hds2012), años totales de las series utilizadas (Años totales), máxima cantidad de días seguidos con heladas histórico (Máx. Hds histo.), días con heladas en junio 2011 (Hd junio 2011), días con heladas en julio 2011 (Hd julio 2011), días con heladas en junio 2012 (Hd junio 2012), días con heladas en julio 2012 (Hd julio 2012), promedio de días con heladas de junio (Hdm junio) y promedio de días con heladas de julio (Hdm julio) para las estaciones del sur del país | 94 |
| 56. Días seguidos con heladas durante el evento 2012 (Hds2012), cantidad de años en los que se han repetido (Años \geq Hds2012) y cantidad de eventos similares (Eventos \geq Hds2012), años totales de las series utilizadas (Años totales), máxima cantidad de días seguidos con heladas histórico (Máx. Hds histo.), días con heladas en junio 2011 (Hd junio 2011), días con heladas en julio 2011 (Hd julio 2011), días con heladas en junio 2012 (Hd junio 2012), días con heladas en julio 2012 (Hd julio 2012), promedio de días con heladas de junio (Hdm junio) y promedio de días con heladas de julio (Hdm julio), para las estaciones meteorológicas del litoral oeste y centro del país | 95 |
| 57. Días seguidos con heladas durante el evento 2012 (Hds2012), cantidad de años en los que se han repetido (Años \geq Hds2012) y cantidad de eventos similares (Eventos \geq Hds2012), años totales de las series utilizadas (Años totales), máxima cantidad de días seguidos con heladas histórico (Máx. Hds histo.), días con heladas en junio 2011 (Hd junio 2011), días con heladas en julio 2011 | |

| | |
|--|----|
| (Hd julio 2011), días con heladas en junio 2012 (Hd junio 2012), días con heladas en julio 2012 (Hd julio 2012), promedio de días con heladas de junio (Hdm junio) y promedio de días con heladas de julio (Hdm julio), para las estaciones meteorológicas del noreste y norte del país | 96 |
| 58. Días seguidos con temp. de -2 °C o menos durante el evento 2012 (Hds2012), cantidad de años en los que se han repetido (Años>=Hds2012) y cantidad de eventos similares (Eventos>=Hds2012), días con temp. de -2 °C o menos en junio 2011 (Hd junio 2011), días con temp. de -2 °C o menos en julio 2011 (Hd julio 2011), días con temp. de -2 °C o menos en junio 2012 (Hd junio 2012), días con temp. de -2 °C o menos en julio 2012 (Hd julio 2012), promedio de días con temp. de -2 °C o menos de junio (Hdm junio) y promedio de días con temp. de -2 °C o menos de julio (Hdm julio), para las estaciones meteorológicas del sur del país | 97 |
| 59. Días seguidos con temp. de -2 °C o menos durante el evento 2012 (Hds2012), cantidad de años en los que se han repetido (Años>=Hds2012) y cantidad de eventos similares (Eventos>=Hds2012), días con temp. de -2 °C o menos en junio 2011 (Hd junio 2011), días con temp. de -2 °C o menos en julio 2011 (Hd julio 2011), días con temp. de -2 °C o menos en junio 2012 (Hd junio 2012), días con temp. de -2 °C o menos en julio 2012 (Hd julio 2012), promedio de días con temp. de -2 °C o menos de junio (Hdm junio) y promedio de días con temp. de -2 °C o menos de julio (Hdm julio), para las estaciones meteorológicas del litoral oeste y centro del país | 98 |
| 60. Días seguidos con temp. de -2 °C o menos durante el evento 2012 (Hds2012), cantidad de años en los que se han repetido (Años>=Hds2012) y cantidad de eventos similares (Eventos>=Hds2012), días con temp. de -2 °C o menos en junio 2011 (Hd junio 2011), días con temp. de -2 °C o menos en julio 2011 (Hd julio 2011), días con temp. de -2 °C o menos en junio 2012 (Hd junio 2012), días con temp. de -2 °C o menos en julio 2012 (Hd julio 2012), promedio de días con temp. de -2 °C o menos de junio (Hdm junio) y promedio de días con temp. de -2 °C o menos de julio (Hdm julio), para las estaciones meteorológicas del noreste y norte del país | 99 |

Foto No.

1. Plantaciones de *E. globulus spp. globulus* en el departamento de Lavalleja antes del evento extremo de helada de junio de 2012 27
2. Plantaciones de *E. globulus spp. globulus* en el departamento de Lavalleja después del evento extremo de helada de junio de 2012 28

Gráfica No.

1. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral -4 °C, de la estación Artigas..... 76
2. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación Artigas 76
3. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación Rocha..... 79
4. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación INIA Treinta y Tres 80
5. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación INIA Salto Grande 82
6. Temperatura media diaria durante abril, mayo, junio y julio, de los años 2011 y 2012 en la estación meteorológica Melo 100
7. Temperatura media diaria durante abril, mayo, junio y julio, de los años 2011 y 2012 en la estación meteorológica INIA Treinta y Tres..... 101
8. Temperatura media diaria durante abril, mayo, junio y julio, de los años 2011 y 2012 en la estación meteorológica Rocha 101
9. Temperatura media diaria durante abril, mayo, junio y julio, de los años 2011 y 2012 en la estación meteorológica Carrasco 102
10. Temperatura media diaria durante abril, mayo, junio y julio, de los años 2011 y 2012 en la estación meteorológica Mercedes 102
11. Temperatura media diaria durante abril, mayo, junio y julio, de los años 2011 y 2012 en la estación meteorológica Salto 103
12. Temperatura mínima diaria durante abril, mayo, junio y julio, de los años 2011 y 2012 en la estación meteorológica INIA Treinta y Tres..... 104

| | |
|---|-----|
| 13. Temperatura mínima diaria durante abril, mayo, junio y julio, de los años 2011 y 2012 en la estación meteorológica Mercedes | 104 |
|---|-----|

Imagen No.

| | |
|--|----|
| 1. Temperatura de superficie del día 7 de junio de 2012 a las 05:03 horas .. | 26 |
| 2. Temperatura de superficie del día 8 de junio de 2012 a las 04:40 horas .. | 26 |

Mapa No.

| | |
|---|----|
| 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas | 31 |
| 2. Porcentaje (%) de años con heladas en cada estación meteorológica, usando el umbral 0°C | 57 |
| 3. Fecha media de ocurrencia de primera helada en cada estación meteorológica, usando el umbral 0 °C..... | 58 |
| 4. Isolíneas de fecha media de ocurrencia de primera helada, usando el umbral 0 °C..... | 59 |
| 5. Fecha media de ocurrencia de última helada en cada estación meteorológica, usando el umbral 0 °C..... | 60 |
| 6. Isolíneas de fecha media de ocurrencia de última helada, usando el umbral 0 °C..... | 61 |
| 7. Período medio con heladas de cada estación meteorológica, usando el umbral 0 °C..... | 62 |
| 8. Isolíneas del período medio con heladas, usando el umbral 0 °C | 63 |
| 9. Período medio libre de heladas de cada estación meteorológica, usando el umbral 0 °C | 64 |
| 10. Isolíneas del período medio libre de heladas, usando el umbral 0 °C | 65 |

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se enmarca dentro de la ciencia de la agrometeorología, esta disciplina estudia y define las interacciones entre los factores meteorológicos y climáticos con la agricultura en el sentido más amplio, para generar datos y herramientas, que se proveen a los actores agrícolas, para enfrentarse a los problemas que generan las variaciones meteorológicas y climáticas en la producción (FAO, 2010).

Cuando ocurre un evento térmico de bajas temperaturas severo, los cultivos sensibles pueden sufrir daños lo cual afecta la producción y genera pérdidas económicas (FAO, 2010), un ejemplo de esto fue el evento del año 2012 que generó daños en la producción citrícola y forestal del país, por lo que existe la necesidad de generar información a nivel nacional sobre dicho evento (INTA 2012, Jornada de Divulgación sobre Daños por Heladas en Citricultura, 2012).

Esta tesis, se propone como objetivo general realizar contribuciones a la caracterización de la ocurrencia de heladas en el país, tanto presentando herramientas y metodologías de análisis, como sus resultados.

En línea con ello, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Estimar parámetros medios y valores extremos del régimen agroclimático de heladas, procesando los datos con diferentes umbrales de temperatura mínima medidas en casilla meteorológica.
- Caracterizar las heladas primaverales y otoñales de acuerdo a su peligrosidad.
- Plantear diferentes métodos para la estimación de fechas de ocurrencia de primeras y últimas heladas con diferentes niveles de probabilidad y ejemplos de aplicaciones de los mismos.
- Realizar un análisis descriptivo del evento extremo de heladas de junio 2012, que fue generador de grandes perjuicios, sobre todo para la producción forestal y citrícola, principalmente al norte del Río Negro.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. HELADAS: DEFINICIONES Y CLASIFICACIÓN

La helada meteorológica es la ocurrencia de una temperatura del aire de 0 °C o inferior, medida a una altura de entre 1,25 y 2,0 m por encima del nivel del suelo, dentro de una casilla meteorológica adecuada, observación que usualmente se hace con el termómetro de mínimas (Rosenberg et al. 1983, OMM 1987, Corsi y Genta 1992, FAO 2010).

Por otro lado, existe el un concepto de helada agrometeorológica, que está más relacionado con el daño a los cultivos; formalmente se define como el descenso de la temperatura del aire a 0 °C o menos, medida a una altura de 0,05 m por encima del suelo, a la intemperie (UdelaR. FA 2010, Castaño et al. 2011).

Las heladas se puede clasificar de acuerdo a diferentes criterios: según tipo genético (de radiación, de advección y mixtas), según tipo visual (blancas o negras) y según época de ocurrencia (invernales, estivales, otoñales y primaverales) (FAO 2010, UdelaR. FA 2010).

Las heladas de radiación son un tipo de helada cuyo alcance es de extensión local. Se suelen presentar en noches con: cielo despejado, en calma o con poco viento y temperaturas del punto de rocío bajas, es decir con baja humedad en el aire. Por lo general la temperatura del aire cae por debajo de 0 °C durante la noche pero estuvo por encima de 0 °C durante el día (FAO 2010, UdelaR. FA 2010).

Durante este tipo de heladas se genera un perfil de inversión térmica debido a que durante la noche con cielo despejado, se pierde más calor por radiación que el que se recibe y ello conduce a una disminución de la temperatura cerca de la superficie que está perdiendo radiación, provocando la formación de una inversión del perfil normal de la temperatura, es decir que durante la noche con helada de radiación la temperatura aumenta con la altura (FAO 2010, UdelaR. FA 2010).

El nivel donde el perfil de temperatura cambia de una inversión a una condición normal del gradiente de temperatura (disminuye la temperatura con la altura), se denomina techo de inversión. Una inversión débil es de techo alto y una inversión fuerte es de techo bajo; cuanto más bajo es el techo hay un más rápido incremento de la temperatura con la altura (FAO, 2010).

La altura de la parte superior de la inversión térmica es variable dependiendo de la topografía local y de las condiciones meteorológicas, pero generalmente varía de los 9 a los 60 m (Perry, citado por FAO, 2010).

Se debe tener en cuenta que las características de las heladas por radiación varían considerablemente tanto con las condiciones generales de la atmósfera como con las diferencias locales en topografía, vegetación y otros factores micrometeorológicos (Rosenberg et al. 1983, FAO 2010).

Durante las noches en las que ocurren heladas, que en su génesis tienen un componente radiativo y por lo tanto generan una inversión del perfil normal de temperatura, las temperaturas mínimas que se observan en casilla resultan eficientes para asociar el evento a daños en cultivos que se encuentren aproximadamente a 1,5 m del suelo, por ejemplo frutales, maíz, sorgo, girasol; pero en cultivos de menor porte, por ejemplo pastos o plantines de árboles de eucaliptos recién plantados, se requieren lecturas de la temperatura mínima a unos 0,10 o 0,15 m; como no es común que se posean dichos datos varios autores han estudiado la diferencia que existe en la temperatura a diferentes alturas del suelo durante las noches con inversión térmica para así poder estimar qué temperatura ocurrió a una menor altura (Alarcón Velazco y Trebejo Varillas, 2010).

Al respecto Villegas y Rosas, citados en Alarcón Velazco y Trebejo Varillas (2010) encuentran una diferencia de 1,63 °C a 2 °C, entre la temperatura mínima medida en una casilla meteorológica y la temperatura medida a 0,5 m del suelo, en valle del Mantaro (Junín, Perú), siendo la menor temperatura la más cercana al suelo, como ocurren en una inversión térmica, típicas de las noches con heladas por radiación.

Sentelhas et al. (1995) encontraron en San Pablo (Brasil) una diferencia entre la temperatura mínima medida en casilla y la temperatura sobre el césped, de 4,1 °C, variando de 3,3 a 5,7 °C.

En el trabajo nacional de Castaño et al. (2011) se explica que la temperatura mínima sobre el césped es una variable de escaso registro en el país y a su vez con series incompletas, lo que llevó a que se elaborara una metodología para estimarla indirectamente. Para esto se usaron datos nacionales desde el 1 de mayo hasta el 31 de octubre, período en el cual se manifiestan las heladas típicamente en Uruguay, y se estudió la correlación entre la temperatura mínima en abrigo meteorológico y la temperatura mínima sobre el césped. Las estaciones meteorológicas consideradas en este estudio, a partir del cual se elaboraron mapas nacionales, fueron tan sólo 3: INIA Salto, INIA Treinta y Tres e INIA La Estanzuela; durante el período comprendido entre mayo y octubre de los años 1984 y 2009. El resultado de este estudio muestra que ambas variables están correlacionadas linealmente, (siendo la temperatura

sobre el césped = $-3,9396 + 1,1122 \times \text{temperatura en casilla}$, con un coeficiente de determinación de 0,8341.

También en el trabajo nacional de Corsi y Genta (1992), en el cual trabajaron con datos de la estación INIA Salto Grande, en el período comprendido entre los años 1971 y 1991, se explica que si bien promediamente la temperatura mínima de césped es de alrededor de 2 °C menor que la de abrigo, cuando se registran heladas de radiación puede haber una diferencia mayor como ocurrió en la helada registrada en la estación experimental INIA Salto Grande el 15 de junio de 1987, en la que la diferencia fue de 5,5 °C con un registro de -2,8 °C en abrigo y -8,3 °C en césped.

Tomado en cuenta las referencias citadas previamente, en cuanto a la diferencia que existe en la temperatura mínima a diferentes alturas por encima del suelo, durante las noches con heladas en las que ocurre inversión térmica, y considerando también que existen variaciones en cuanto a la altura de los cultivos y los umbrales de daños de éstos, se puede caracterizar a las heladas eligiendo diferentes umbrales para procesar los datos de temperatura mínima a nivel de casilla, ya que umbrales de temperaturas positivas a nivel de casilla pueden significar un umbral de daño a una menor altura, donde se encuentra la planta, dependiendo de la temperatura crítica propia del cultivo a evaluar. Además también se pueden incluir umbrales negativos para procesar la información medida en casilla, ya que un determinado umbral negativo a nivel de casilla puede significar a nivel de suelo o simplemente a una menor altura, un umbral de supervivencia de determinada especie (Alarcón Velazco y Trebejo Varillas 2010, Castaño et al. 2011).

Por lo anteriormente mencionado Alarcón Velazco y Trebejo Varillas (2010) realizan los cálculos para caracterizar las heladas utilizando umbrales de temperaturas mínimas medidas en casilla de: -6 °C, -3 °C, 0 °C, 3 °C y 6 °C; esto logra caracterizar a las heladas teniendo en cuenta la diferencia que existe en la temperatura mínima con la altura, durante las noche con heladas en las que ocurre inversión térmica, para así poder elegir un umbral que permita evaluar los posibles daños al cultivo, teniendo en cuenta la altura de este y su umbral de daño.

Además de las heladas que se generan por procesos radiativos, están las heladas de advección que son eventos esporádicos que abarcan grandes extensiones, sobre todo continentales, ya que se producen cuando una masa de aire frío invade un área para reemplazar el aire más caliente que estaba presente, por lo que en este tipo de heladas no se forma un perfil de inversión térmica, en general las temperaturas caen por debajo de 0 °C durante el día y la noche. Estas heladas están asociadas con condiciones de tiempo de nubosidad, vientos de moderados a fuertes y baja humedad en el aire (Biel, citado por Rosenberg et al. 1983, Corsi y Genta 1992, FAO 2010).

Por último las heladas mixtas son heladas que se generan por la combinación de proceso advectivos y radiativos, por ejemplo primero ocurre una invasión de una masa de aire frío, lo que genera una caída general de la temperatura, que luego es acompañada por la ocurrencia de heladas locales por pérdida de radiación. En Uruguay lo más común es que las heladas sean de tipo mixtas (FAO 2010, UdelaR. FA 2010).

Cuadro No. 1. Comparación entre condiciones en heladas por advección y por radiación

| Tipo de helada | |
|----------------------------------|-------------------------------|
| Radiación | Advección |
| Pérdida de energía por radiación | Invasión de masa de aire frío |
| Frecuentes | Esporádicas |
| Local | Grandes extensiones |
| Sin viento y nubosidad | Con viento y nubosidad |
| Baja humedad | |

Según el tipo visual pueden ser “heladas blancas” o “heladas negras”. Una “helada blanca” ocurre cuando se da la deposición o sublimación regresiva del vapor de agua (pasa del estado gaseoso a sólido) sobre la superficie de los vegetales y forma una capa blanca que se denomina normalmente “escarcha” (Rosenberg et al. 1983, Corsi y Genta 1992, FAO 2010).

Una “helada negra” ocurre cuando la temperatura desciende por debajo de 0 °C y no se forma escarcha sobre la superficie, produciendo el congelamiento interno de la vegetación, su nombre proviene de la apariencia de los tejidos necrosados por la deshidratación de las células, visible en la horas o días posteriores a la ocurrencia del evento de bajas temperaturas (Rosenberg et al. 1983, Corsi y Genta 1992, FAO 2010).

Si la humedad del aire es muy baja, entonces la temperatura de la superficie de las plantas puede que no alcance la temperatura del punto de solidificación del agua, en cambio, cuando la humedad es alta, es más probable que se deposite la escarcha sobre los vegetales y se produzca una “helada blanca”; éstas normalmente producen menos daños que las “heladas negras” ya que durante el proceso de deposición de escarcha se libera calor latente y además la formación de escarcha sobre la planta tiende a aislar a la planta de más frío (Corsi y Genta 1992, FAO 2010).

Según la época de ocurrencia las heladas se clasifican en: invernales, estivales, otoñales y primaverales (Burgos 1963, FAO 2010, UdelaR. FA 2010).

El régimen de heladas invernales, debe estar más enfocado en la intensidad de las heladas que en el detalle de las fechas de evento, porque la resistencia a los fríos durante la estación invernal es constante en cada especie

vegetal. Además la resistencia máxima al frío del invierno es una característica determinada de cada especie o variedad, que establece el límite crítico de su supervivencia (Burgos, 1963).

En el caso de las heladas estivales también interesa más conocer su intensidad que la fecha de ocurrencia, ya que la resistencia al frío de la vegetación estival también es constante durante dicha estación (Burgos, 1963).

Por otro lado las heladas primaverales y otoñales deben caracterizarse más por la fecha en que se producen que por su intensidad, ya que la sensibilidad de las plantas es variable durante el transcurso de dichas estaciones, lo cual está relacionado con el proceso fisiológico de endurecimiento o rusticidad, dicho proceso consiste en la progresiva adaptación de las plantas a las bajas temperaturas que les confiere resistencia a heladas. Después de someterse a períodos fríos, las plantas tienden a endurecerse, es decir se vuelven más resistentes al daño por congelación y pierden su endurecimiento luego de una temporada cálida, por lo que las heladas que sobrevienen luego de períodos calurosos o veranillos suelen ser mucho más dañinas que si la planta se hubiera sometido gradualmente a bajas temperaturas, ya que encuentran a la planta en un estado de mayor vulnerabilidad (Burgos 1963, Corsi y Genta 1992, UdelaR. FA 2010).

Según FAO (2010) el endurecimiento está relacionado, con el aumento del contenido de solutos en el tejido de las plantas y/o con la disminución de la concentración de bacterias activas en la nucleación de hielo (INA) durante los períodos fríos. Durante los períodos cálidos, las plantas exhiben crecimiento vegetativo, el cual reduce la concentración de solutos, y aumenta la concentración de bacterias INA, haciendo las plantas menos resistentes.

2.2. SUSCEPTIBILIDAD DE LAS PLANTAS A LAS BAJAS TEMPERATURAS

2.2.1. El daño producido por las heladas en las plantas: causas fisiológicas, tipos de daño y síntomas a nivel de planta

El daño que producen las heladas en las plantas, está relacionado al congelamiento del agua que constituye los tejidos vegetales. Si el congelamiento es intercelular provoca la salida del agua de la célula hacia afuera de ésta, en este caso el daño es indirecto debido a la deshidratación de las células, pudiendo llegar a la muerte celular cuando el protoplasma no reabsorbe agua una vez que ocurre el descongelamiento (Balmelli 1993, FAO 2010).

Por otro lado, cuando la temperatura es tan baja que además se congela el agua intracelular, formándose cristales de hielo, éstos provocan la destrucción mecánica de los componentes celulares, siendo en este caso un daño directo, que genera la muerte de las células (Corsi y Genta, 1992).

A nivel de planta, los daños pueden ir desde el cambio de color en las hojas, pasando por la muerte de hojas y ramas (pudiéndose recuperar por la brotación de yemas axilares), rajaduras verticales de la corteza hasta la madera, muerte del tallo, en parte o hasta el suelo (pudiéndose recuperar, en el caso de los eucaliptos, por brotes epicórmicos) hasta la muerte total de la planta, incluso de las raíces (FAO 1981, Balmelli 1993).

2.2.2. Características propias de las plantas que aumentan o disminuyen su susceptibilidad a las heladas

Una de las características a tener en cuenta es la edad y el desarrollo alcanzado por la planta. Las temperaturas más bajas se dan a nivel del suelo en las noches con inversión térmica, por lo tanto las plantas jóvenes o mal desarrolladas (es decir de menor altura) están más expuestas al frío y sufrirán daños mayores (Prado, citado por Balmelli, 1993).

También la lignificación es importante, ésta está relacionada con la edad, una mayor lignificación disminuye el riesgo de daño en el cambium y por lo tanto aumenta la resistencia al frío (Prado, citado por Balmelli, 1993).

También el estado fenológico debe tenerse en cuenta, ya que el daño es mayor cuando la planta se encuentra en activo crecimiento vegetativo. Por lo tanto las heladas a principio de otoño y al final de la primavera son las más dañinas ya que encuentran a las plantas vegetando o en actividad vegetativa respectivamente (FAO, citado por Balmelli 1993, UdelaR. FA 2010).

Por último hay que tener en cuenta la resistencia genética de la planta. Cada especie vegetal tiene una temperatura por debajo de la cual se producen daños (Lacroix, citado por Balmelli, 1993).

2.2.3. Resistencia a las heladas de las especies forestales

Es importante estudiar la resistencia a las heladas de las especies forestales que se plantan en el país, ya que es un sector productivo relativamente nuevo en el país que se ha desarrollado de manera importante a partir de la promulgación de la segunda Ley forestal No. 15.939 en el año 1987,

llegando a 695.093 hectáreas de plantaciones forestales en el 2011, (MGAP. DGF, 2014). De éstas, 177.756 hectáreas corresponden a *Eucalyptus globulus*; 253.720 hectáreas a *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus dunnii* y *Eucalyptus saligna*; 167.776 hectáreas a *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* (MGAP. DGF, 2014).

Las especies del género *Eucalyptus* que más se utilizan actualmente en el país (*E. grandis*, *E. globulus ssp. globulus* y *E. globulus ssp. maidenii*) no tienen la suficiente resistencia al frío genética como para garantizar su supervivencia en años en los que ocurren eventos de heladas severos (Golfari et al., FAO, Prado, Marcó et al., citados por Balmelli, 1993).

La calidad de un sitio desde el punto de vista forestal es el resultado de la combinación de una serie de factores, entre los cuales el clima y el suelo son los de mayor importancia (Balmelli, 1993). Los factores climáticos que condicionan más la adaptación y crecimiento de los árboles son las precipitaciones y las temperaturas, y dentro de éstas, las temperaturas mínimas son las que generan mayores daños, pudiendo matar parte o la totalidad de la planta con una sola ocurrencia (Prado, citado por Balmelli, 1993). Sobre todo los dos primeros años luego de la plantación constituyen el período en el que los eucaliptos son más susceptibles a tener daños por heladas (FAO, 1981).

Dentro de cada especie, según las condiciones ambientales de la zona de origen y principalmente en aquellas con una amplia área de distribución natural, existen varios ecotipos u orígenes de la especie con importantes diferencias en cuanto a la adaptación al frío (FAO, Wilcox, Alliani y Gea, Rockwood y Meskimen, Prado, citados por Balmelli, 1993).

Variaciones en altitud dentro de la zona de distribución natural, aún en una misma área geográfica, pueden significar un gran cambio en cuanto a la resistencia al frío (Marcó et al., Prado, citados por Balmelli, 1993). Esta variación dentro de cada especie, puede ser tan grande como la variación que se encuentra entre especies (FAO, 1981).

Aunque, de igual forma que para las especies, existen evidencias de que no es posible predecir el comportamiento de un origen determinado frente a las heladas, solamente por las condiciones climáticas de la zona de distribución natural (Rockwood et al., citados por Balmelli, 1993).

De todos modos, las condiciones climáticas de las áreas de distribución natural, en cuanto a temperaturas mínimas se refiere, pueden servir de punto de partida para el estudio de la resistencia al frío de algunas de las especies del género *Eucalyptus* (Balmelli, 1993).

En el Cuadro No. 2 se muestra: la temperatura media del mes más frío, la temperatura mínima absoluta y el número de heladas anuales, de la zona de distribución natural de varias especies de eucaliptos. Como se puede observar,

las especies *E. globulus ssp. bicosata* y *E. globulus ssp. maidenii* provienen de áreas con mayor frecuencia e intensidad de heladas, por lo que se esperaría una mayor adaptación y resistencia al frío que las especies *E. globulus ssp. globulus* y *E. grandis* (Balmelli, 1993).

Cuadro No. 2. Características climáticas de las áreas de distribución natural de diferentes especies de eucaliptos

| Especie | Temp. media mes más frío (°C) | Temp. mín. absoluta (°C) | No. de heladas anuales |
|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------|
| <i>E. globulus ssp. maidenii</i> | 5 | -9,5 | 10 a 120 |
| <i>E. globulus ssp. bicosata</i> | 2 a 7 | -9,5 | 10 a 50 |
| <i>E. globulus ssp. globulus</i> | 4 | -6,5 | 10 a 20 |
| <i>E. grandis</i> | 5 a 6 | -5,0 | 0 a 20 |

Fuente: Krall, FAO, Rockwood y Meskimen, citados por Balmelli (1993).

El comportamiento de estas especies frente a las heladas fuera de Australia, también debe ser tenido en cuenta ya que, pueden existir comportamientos diferentes a los presentados en el área de distribución natural (Balmelli, 1993).

Según Gentilli, citado por Balmelli (1993) en Italia, el *E. globulus ssp. bicosata* resistió hasta -8 °C y el *E. globulus ssp. globulus* y *E. globulus ssp. maidenii* resistieron hasta -7 °C.

Según FAO (1981) en Irlanda el *E. globulus ssp. globulus* ha sobrevivido a temperaturas de hasta -9 °C; en el Reino Unido hasta -7 °C; en Francia hasta -8 °C, igual que el *E. globulus ssp. bicosata*. En Sudáfrica, se recomienda entre otras especies al *E. globulus ssp. maidenii*, considerada como muy resistente a heladas; en cambio *E. globulus ssp. globulus* está considerada como moderadamente resistente y *E. grandis* como poco resistente.

Según Prado, citado por Balmelli (1993) en Chile se recomiendan como especies resistentes al frío a *E. globulus ssp. maidenii*, *E. Globulus ssp. bicosata* y *E. globulus ssp. globulus* que resisten hasta -9, -8 y -7 °C respectivamente.

Según EMBRAPA (1986) se recomienda *E. grandis* solamente para las regiones climáticas con menor ocurrencia de heladas.

Según Golfari et al., citados por Balmelli (1993) se recomienda *E. grandis* para lugares con temperaturas mínimas no inferiores a -4 °C y *E. globulus ssp. bicostata* para lugares con mínimas no inferiores a -6 °C.

Según Marcó et al., citados por Balmelli (1993) existe evidencia de grandes variaciones, en cuanto a la tolerancia a heladas, entre orígenes y procedencias de *E. grandis* por lo que éstas deben considerarse por separado.

En el trabajo de Gallino et al. (2007) se evaluaron 16 clones de la especie *E. globulus* para determinar el TL50% de cada uno de los clones (umbral de temperaturas que causan un daño al 50% de la superficie del tejido foliar), tomándose muestras de árboles de 3 años de edad. Resultó que el TL50% para los clones más sensibles al frío presentaba valores de -4,5 °C aproximadamente y para los clones más resistentes valores de -7,5 °C aproximadamente.

Pitz Floriani et al. (2013) evaluaron 4 especies (*E. dunnii*, *E. benthamii*, *E. grandis* y *E. saligna*) para determinar los umbrales de TL50% (temperatura letal del 50% o temperatura donde ocurre el 50% de la muerte celular), para esto se usaron plantas de 3 meses, de aproximadamente 0,5 m de alto, de las cuatro especies; y se sometieron a dos tratamientos: uno sin endurecimiento y otro con un período de endurecimiento de 21 días, en el que las plantas se sometían a temperatura de entre 1 °C y 5 °C. Resultó que para *E. grandis*, las plantas sometidas a un período de endurecimiento la TL50% era de -2,0 °C y sin endurecimiento la TL50% era de -4,7 °C.

Observando el Cuadro No. 3 tomado de Pitz Floriani et al. (2013), se observa que *E. benthamii* y *E. dunnii* presentan mayor resistencia al frío que *E. grandis* y *E. saligna*, cuando no hubo un período de endurecimiento o rusticación previo. Sólo existen diferencias significativas en la TL50% cuando no hubo un período de rusticación previo, en cambio si lo hubo no existen diferencias estadísticas en la TL50% de las especies evaluadas, (Pitz Floriani et al., 2013).

Cuadro No. 3. TL50% de diferentes especies de eucaliptos, sometidas a dos períodos de endurecimiento, y diferencias con test de Tukey ($p < 0,05$)

| Especie | TL50% (°C) | |
|---------------------|----------------------------------|---------|
| | Período de endurecimiento (días) | |
| | 0 | 21 |
| <i>E. benthamii</i> | -4,56 a | -5,08 a |
| <i>E. dunnii</i> | -3,87 b | -5,03 a |
| <i>E. grandis</i> | -2,00 c | -4,72 a |
| <i>E. saligna</i> | -2,00 c | -5,02 a |

Fuente: Pitz Floriani et al. (2013).

Además de las especies forestales hay muchas plantas sensibles a los daños por bajas temperaturas, según Levitt, citado por FAO (2010); las plantas se agrupan en cuatro categorías de sensibilidad a la congelación: frágiles, ligeramente resistentes, moderadamente resistentes y muy resistentes.

Las plantas frágiles son aquellas que no logran evitar la congelación intracelular (ejemplo muchas plantas tropicales) (Levitt, citado por FAO, 2010).

Las plantas ligeramente resistentes son sensibles al daño hasta los -5 °C (Levitt, citado por FAO, 2010).

Las plantas moderadamente resistentes incluyen aquellas que pueden acumular suficientes solutos para resistir el daño por heladas hasta temperaturas tan bajas como -10 °C, principalmente evitando el daño por deshidratación (Levitt, citado por FAO, 2010).

Y las plantas muy resistentes son capaces de evitar la congelación intracelular así como de evitar el daño debido a la deshidratación de las células hasta umbrales más bajos que -10 °C (Levitt, citado por FAO, 2010).

2.3. FACTORES AMBIENTALES QUE DETERMINAN LA OCURRENCIA DE HELADAS

La ocurrencia de las heladas se debe a la acción de distintos factores físicos del ambiente que pueden separarse, para su mejor estudio, en dos grupos según la magnitud del proceso atmosférico que involucran: uno de factores macrometeorológicos y otro de factores meso-micrometeorológicos (Burgos, 1963).

Los factores macrometeorológicos, son el balance calórico regional de radiación y la circulación regional de la atmósfera (Burgos, 1963).

Del balance calórico regional de radiación surge el régimen térmico regional que es determinante para la ocurrencia de heladas ya que determinan el calentamiento y enfriamiento de la superficie. Los elementos astronómicos del balance calórico que hay que considerar son: la energía que emite el sol, la duración relativa de los periodos diurno y nocturno, y la inclinación con que la Tierra recibe los rayos solares. Estos elementos son diferentes según la latitud y muestran una variación periódica regular durante el año, porque son consecuencia de los movimientos de la Tierra, por lo que determinan en cada zona de la Tierra diferentes periodos donde ocurren las heladas típicamente (Burgos, 1963).

También hay que tener en cuenta los elementos del balance calórico que dependen de la atmósfera y el componente geográfico del balance (accidentes de la superficie terrestre), que provocan variaciones en el balance calórico de radiación regional, ya que afectan la energía solar que recibe la Tierra y la que ésta irradia (Burgos, 1963).

El Sol emite energía radiante que llega al extremo superior de la atmósfera con una densidad de flujo de radiación solar de casi $1,94 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, en un plano perpendicular a la dirección de la radiación y a la distancia media entre el Sol y la Tierra; dicho valor es llamado la constante solar (Burgos, 1963).

Por la elevada temperatura del Sol, cuya superficie se encuentra a $6000 \text{ }^\circ\text{K}$ aproximadamente, el 50% de radiación ocurre en las bandas de onda corta comprendidas entre $0,38$ y $0,77 \text{ } \mu\text{m}$ (micrómetros o micra, que es igual a 10^{-6} m); los extremos se encuentran entre $0,15$ y $4 \text{ } \mu\text{m}$, con una intensidad máxima de radiación en la banda de $0,47 \text{ } \mu\text{m}$ (Burgos, 1963).

Una pequeña parte de esa energía es absorbida por la atmósfera (por el ozono y el oxígeno atómico, que absorben en el espectro ultravioleta) y otra parte dispersada en todas direcciones por los aerosoles, lo que provoca una disminución de la energía que llega a la superficie. Otra parte pasa por el proceso de reflexión por las nubes (Burgos, 1963).

De la energía solar que llega a la superficie terrestre una parte es absorbida y otra es reflejada, a esta relación se la identifica con el valor del albedo (Burgos, 1963).

El hecho de que la temperatura de la Tierra no aumente indefinidamente demuestra que esta energía que llega a la Tierra, también se pierde en la misma proporción en la que es absorbida, esto sucede ya que también la Tierra, como el Sol, se comporta físicamente como un cuerpo negro,

es decir, que absorbe toda la energía que incide sobre ella y emite en un espectro continuo de longitudes de onda, de acuerdo con su temperatura. En este caso, como la temperatura de la Tierra es mucho menor (300 °K), la energía emitida por la Tierra es de onda larga (4 a 120 μm) con una intensidad máxima de radiación en las bandas próximas a 10 μm (Burgos, 1963).

La atmósfera resulta casi transparente para la radiación de onda corta o solar, ya que absorbe sólo el 14%, en cambio para la de onda larga o terrestre resulta casi opaca, pues puede llegar a absorber hasta el 85%. Los componentes atmosféricos responsables de esta absorción son principalmente el agua (en sus tres estados, sólido, líquido y vapor), el anhídrido carbónico y todos los gases de efecto invernadero; también en mucho menor grado, el ozono y el oxígeno (Burgos, 1963).

Esta selectividad de la atmósfera, en la absorción de la radiación solar y terrestre, es la causa principal de las temperaturas relativamente elevadas y favorables para la vida que registra nuestro planeta, ya que una buena parte de la energía de onda larga, absorbida por ella, es reirradiada hacia la Tierra como contrarradiación o radiación atmosférica. Este efecto, que ocurre tanto de día como de noche, evita un enfriamiento muy marcado de la superficie terrestre como el que se experimentaría de no existir atmósfera (Burgos, 1963).

En conclusión, el balance de radiación, se establece con la integración de todos los elementos nombrados, que se pueden separar en dos flujos de radiación de sentido opuesto, que determinan el calentamiento o enfriamiento temporario de la Tierra (Burgos, 1963)

En la Tierra los principales destinos de la energía neta del balance de radiación son: calentamiento del aire, calentamiento del suelo y cambios de estados del agua, es decir que estos procesos consumen radiación que emite la Tierra haciendo que esta se enfríe (UdelaR. FA, 2010).

El balance negativo de radiación que se establece durante la noche y en latitudes extratropicales durante el año (en los meses en los que la noche es más larga que el día) constituye una de las causas del descenso diario y anual de la temperatura, y del establecimiento de períodos en los que es frecuente ocurrencia de heladas. Las heladas que ocurren en épocas del año en que los días comienzan a ser más largos que las noches, como principio de primavera se deben a la anulación de los débiles balances positivos locales propios de dicha época (Burgos, 1963).

Se debe tener en cuenta que las diferentes estructuras presentes en la superficie de la Tierra, modifican el balance y determinan que haya diferencias en el régimen térmico en cada una de ellas (Burgos, 1963).

El contraste más marcado se puede observar al comparar las superficies continentales y las oceánicas. En las superficies continentales el suelo, que es un medio poroso y disperso, y por lo tanto posee una baja conductividad térmica, absorbe la radiación solar y atmosférica transformándola en calor, que luego es intercambiado con la atmosfera, desde una capa muy superficial. En los continentes es posible observar una variación en la temperatura sólo hasta los 10 a 15 metros de profundidad. Por lo que las superficies continentales resultan extremadamente calentadas o enfriadas por balances positivos o negativos de radiación. Se puede decir que las masas continentales tienen una escasa capacidad de almacenaje de calor y por lo tanto es más común la ocurrencia de heladas sobre su superficie (Burgos, 1963).

En cambio en el océano, el calor penetra por difusión turbulenta hasta grandes profundidades, registrándose en él variaciones de temperatura hasta más allá de los 200 metros de profundidad. Además como el calor específico del agua (4,186 J/g.°C) es considerablemente mayor que el del suelo (1,65 J/g.°C aproximadamente), el océano absorbe 2,5 veces más energía que el suelo por unidad de volumen para un aumento de un grado en la temperatura. Esto significa que las superficies oceánicas se calientan o se enfrían mucho más lentamente que los continentes con balance positivos o negativos de radiación, ya que los océanos ofrecen una capacidad de almacenaje de calor mucho mayor, lo cual también evita la expresión de temperaturas extremas sobre su superficie (Burgos, 1963).

Teniendo en cuenta el otro factor macrometeorológico, que determina la ocurrencia de heladas: la circulación atmosférica; se puede decir que éste determina eventos de heladas riesgoso para las actividades agrícolas ya que provoca eventos de heladas sin una regularidad cronológica, lo cual los hace poco predecibles, y que abarcan grandes extensiones (Burgos, 1963).

Muchos eventos de heladas que causan daños en la agricultura por su duración o su gran intensidad del frío, en general están vinculados con el factor circulación atmosférica general, ya que éste determina el ingreso de una masa de aire frío en una zona, luego esta masa se estaciona y desarrolla un sistema anticiclónico (alta presión atmosférica, el aire desciende desde las capas altas de la atmósfera hacia el suelo) que al favorecer la pérdida de calor que se está radiando desde el suelo durante la noche, lo que acentúa aún más el enfriamiento, generando eventos de heladas muy dañinos (Burgos, 1963).

Por otro lado los factores meso-micrometeorológicos son elementos físicos locales. Se puede decir que siempre y cuando las condiciones macrometeorológicas sean determinantes de heladas, los factores meso-micrometeorológicos específicos del lugar favorecen a dar al evento sus

características locales, determinado por ejemplo la intensidad y duración de los mismos (Burgos, 1963).

Antes de comenzar a nombrar los factores meso-micrometeorológicos se debe tener en cuenta que:

$$RN = R_s (1 - r) + R_{Le}$$

Donde: RN es la radiación neta, R_s es la radiación solar, r es el albedo y R_{Le} es la radiación saliente efectiva.

De noche $R_s=0$, por lo tanto:

$$RN = R_{Le}$$

Además:

$$R_{Le} = ROL_{\downarrow} + ROL_{\uparrow}$$

Donde: ROL_{\downarrow} es la radiación de onda larga entrante (contrarradiación) y ROL_{\uparrow} es la radiación de onda larga saliente (radiación terrestre).

Durante la noche, para mantener el equilibrio energético, el aire (A) y el suelo (S) ceden calor, enfriándose y el agua libera calor latente cambiando de estado, pasando de vapor a líquido y/o de líquido a sólido (LE), lo cual evita la ocurrencia de temperaturas muy bajas cerca de la superficie. Sabiendo esto, el balance de calor durante la noche también puede ser expresado por la siguiente ecuación (FAO 2010, UdelaR. FA 2010):

$$RN = A + S + LE$$

Por ejemplo un factor meso-micrometeorológico que favorece la ocurrencia de heladas es la presencia de cielo despejado en las noches, esto es debido a que se favorece la pérdida de radiación de onda larga (R_{Le}). Por otro lado el incremento de la nubosidad o de cualquier forma de polvo, humo o niebla reduce la radiación saliente efectiva (FAO 2010, UdelaR. FA 2010).

Otro factor es la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, cuanto más seco esté el aire es más probable que ocurra helada. Por otro lado, si la cantidad de vapor de agua en el aire aumenta, el punto de rocío (condensación) se alcanza más rápidamente, lo cual libera calor latente del agua que se cede al ambiente para aumentar su temperatura lo que disminuye la probabilidad de ocurrencia de heladas (FAO 2010, UdelaR. FA 2010).

Además el vapor de agua en la atmósfera, que es el principal gas de efecto invernadero, absorbe parte de la radiación de onda larga emitida por la Tierra, que luego vuelve a irradiar y una parte es denominada como contrarradiación, por lo que se reduce la radiación de onda larga saliente, lo cual también evita la ocurrencia de heladas (R_{Le}) (Burgos 1963, FAO 2010, UdelaR. FA 2010).

Las nubes presentes en la atmósfera también disminuyen la probabilidad de ocurrencia de heladas, de una forma similar a los gases de efecto invernadero, ya que éstas absorben parte de la radiación de onda larga emitida por la Tierra, que luego contra irradian o re emiten hacia la superficie terrestre, por lo que también reducen la radiación de onda larga saliente efectiva (Burgos 1963, UdelaR. FA 2010).

El viento (o circulación local) también reduce la probabilidad de heladas por radiación ya que el viento, al introducir movimientos turbulentos (movimiento de un fluido que se da en forma caótica, sólo predecible hasta cierta escala) en la capa de aire cercana al suelo, genera la mezcla de aire entre los diferentes estratos, impidiendo la estratificación térmica que se genera por la pérdida de radiación y que provoca el estancamiento del aire más frío sobre la superficie donde se encuentran los cultivos. En cambio si el aire está calmo se favorece la estratificación del aire frío sobre el suelo, y la formación de una inversión térmica (Burgos 1963, UdelaR. FA 2010).

La cercanía a grandes volúmenes de agua, como océanos, ríos o embalses, ejerce una gran influencia en el enfriamiento nocturno, ya que estos cuerpos de agua son grandes reservorios de energía que ceden en las noches frías y evitan la ocurrencia de heladas en sus cercanías. Se puede decir que existe un efecto moderador del ambiente marítimo sobre la humedad y la temperatura, y por tanto de las fluctuaciones de la temperatura y la formación del rocío o escarcha (Burgos 1963, Corsi y Genta 1992, FAO 2010, UdelaR. FA 2010).

En cuanto a la topografía, hay mayor probabilidad de ocurrencia de heladas en depresiones topográficas, como valles, que en zonas altas y abiertas del relieve como mesetas. Como el aire frío, más denso, fluye hacia las zonas topográficas más bajas, como valles, la frecuencia de heladas en éstas zonas es mayor (Corsi y Genta 1992, Prado, citado por Balmelli 1993, UdelaR. FA 2010). Según Rosenberg et al. (1983) el factor forma topográfica es más importante que la altitud en la determinación de ocurrencia de heladas.

Cuadro No. 4. Riesgo de heladas relativo a diferentes formas topográficas

| Forma topográfica | Riesgo de helada |
|--|-------------------|
| Cima y parte superior de pendientes | El más bajo |
| Zonas planas y altas | Medio |
| Áreas amplias y planas | Mayor al promedio |
| Laderas angostas y con declive | Alto |
| Parte más baja del seno de una depresión cerrada | El más alto |

Fuente: Corsi y Genta (1992).

Los árboles y/o arbustos que se encuentran en las laderas evitan que el aire fluya hacia las zonas más bajas del terreno por lo que reducen la probabilidad de ocurrencia de heladas o su intensidad. Sin embargo, si se trata de una planicie, en la proximidad de bosques es más probable que ocurran heladas por radiación, ya que los árboles impiden el paso del viento lo cual favorece la estratificación típica de la inversión térmica. Además en el tercio superior de las copas de los árboles existe una temperatura mínima más baja que la ambiente por lo que ese aire frío cuando desciende hacia la superficie del suelo lo enfría (UdelaR. FA, 2010).

Otro factor meso-micrometeorológico que determina la ocurrencia de heladas a nivel local es la condición del suelo, ya que cualquier estado que reduzca su conductividad térmica (cantidad de calor transferido por conductividad molecular, el calor se transfiere de las partes del suelo con mayor temperatura a las partes más frías), o que reduzca su calor específico (la cantidad de calor necesario para que la unidad de masa de un suelo aumente un grado su temperatura en condiciones isobáricas), favorece la ocurrencia de heladas, es decir que cuanto más suelto y seco se encuentre un suelo, es más probable que se enfríe, favoreciendo la ocurrencia de heladas, ya que esto provoca que durante el día se acumule menos energía en profundidad (debido a menor calor específico y conductividad térmica), y a su vez, a la energía acumulada en el suelo le es más difícil conducirse hasta la superficie durante la noche (debido a una menor conductividad térmica) (Burgos 1963, FAO 2010, UdelaR. FA, 2010).

La conductividad térmica de un suelo dependerá de la porosidad y del contenido de humedad de éste. De esta forma los suelos húmedos, en los que hay un desplazamiento del aire por el agua, conducen mejor el calor que los secos, ya que el calor se conduce más rápidamente a capas más profundas. Los suelos húmedos se calentarán más lentamente que los secos, pero mantendrán más el calor, reduciendo las variaciones de temperatura en el suelo y por lo tanto evitando la formación de heladas (FAO 2010, UdelaR. FA 2010).

Relacionado con lo anterior, el riego también es un factor que afecta la ocurrencia de heladas, ya que si se aplica un sistema de riego el suelo estará más húmedo, lo cual disminuye la probabilidad de ocurrencia de heladas (Burgos 1963, UdelaR. FA 2010, Jornada de Divulgación sobre Daños por Heladas en Citricultura 2012).

La cobertura del suelo por malezas o pasturas es un factor que aumenta el riesgo de ocurrencia de heladas, ya que las pérdidas de calor por evapotranspiración son mayores que en un suelo desnudo, y además la temperatura mínima ocurre a la altura del dosel, por lo que queda una porción de aire entre el dosel y el suelo donde se interrumpe el flujo de calor por conducción (UdelaR. FA, 2010).

Además la eliminación de la vegetación permite el calentamiento del suelo durante el día, por lo que durante la noche se libera por radiación el calor conservado en el suelo evitando la expresión de temperaturas muy bajas, por lo que se puede decir que los daños por heladas son mayores en los sitios donde no se eliminan bien las malezas (Prado, citado por Balmelli, 1993).

Otro factor a tener en cuenta es la fertilización, si se realiza en etapas suficientemente distanciadas del comienzo de las heladas disminuye el riesgo de daños por heladas ya que provee a las plantas de un mayor desarrollo (Rockwood, citado por Balmelli, 1993). Sin embargo la fertilización puede ser muy perjudicial si se realiza en la estación de ocurrencia de heladas, ya que aumenta la actividad vegetativa de las plantas, haciéndolas más susceptibles (Prado, citado por Balmelli, 1993).

2.4. RÉGIMEN AGROCLIMÁTICO DE HELADAS

Un régimen agroclimático de heladas es la caracterización climática de las heladas, desde un punto de vista agronómico, en una zona determinada; para su realización se usan diferentes recursos estadísticos que permiten estimar los parámetros y otros valores de interés que caracterizan a las heladas (Burgos, 1963).

Para la realización del régimen se deben tener en cuenta cuatro características de las heladas: época de ocurrencia (fecha), intensidad (temperatura mínima alcanzada), duración (en horas) y tipo genético (de radiación, de advección o mixtas), ya que estas características determinan, en parte, la magnitud del daño provocado a los cultivos (Burgos 1963, Prado, citado por Balmelli 1993). Por ejemplo cuanto menor es la temperatura mínima absoluta alcanzada mayor es el daño producido, también heladas leves pero muy prolongadas pueden ser más dañinas que heladas intensas de poca duración, y además, como ya se mencionó, las heladas que ocurren en otoño y primavera provocarían mayores daños (FAO, 1981)

En general las estaciones meteorológicas no proporcionan la información necesaria para realizar un régimen completo. En general se poseen datos de la época de ocurrencia e intensidad, pero no de la duración de las heladas y tipo genético de éstas (Burgos, 1963).

Como ya se mencionó y justificó anteriormente, las heladas primaverales y otoñales deben ser caracterizadas más por la fecha de ocurrencia que por su intensidad. En cambio las heladas invernales y estivales deben caracterizarse más por la intensidad (Burgos, 1963).

2.4.1. Período medio con heladas y período medio libre de heladas

Los valores medios de fechas de ocurrencia de primera y última helada, y el período medio con y libre de heladas son parámetros estimados que proveen, de por sí y por comparación, una idea de la peligrosidad de las heladas en las diferentes estaciones meteorológicas a estudiar, ya que cuanto más temprano sea la fecha de ocurrencia de heladas en otoño y cuanto más tarde la fecha de ocurrencia de helada en primavera más peligrosas resultan éstas ya que es más probable que encuentren a las plantas menos endurecidas y en un estado fenológico de gran actividad vegetativa. El período medio con heladas es el período típico en el que ocurren heladas, por lo que es un dato útil para la determinación del calendario de las actividades agrícolas (Burgos 1963, Corsi y Genta 1992, UdelaR. FA 2010).

2.4.2. Probabilidad de ocurrencia de primeras y últimas heladas

La estimación de fechas de ocurrencia de primeras y última heladas con diferentes niveles de probabilidades es un recurso estadístico que sirve para poder seleccionar el riesgo a asumir al plantar en una determinada fecha, lo cual es de mucha utilidad en la planificación de las actividades agrícolas.

Para el estimar las fechas de ocurrencia de primeras y últimas heladas con diferentes niveles de probabilidad se pueden usar para el cálculo dos métodos, el método empírico o de frecuencias acumuladas, que es el más exacto, o el método asumiendo una distribución normal de las poblaciones de fechas de primeras y últimas heladas por separado, para este último método debe estudiarse previamente el ajuste al modelo normal de las muestras, realizando pruebas de normalidad, como la Shapiro-Wilk (Burgos 1963, UdelaR. FA 2010)

Varios autores ya han probado que es posible trabajar asumiendo una distribución normal, tal es el caso de Reed, citado por Burgos (1963) que trabajó con valores de fechas de ocurrencia de primera y última heladas de estaciones meteorológicas de EE.UU. y obtuvo que el histograma de densidad se ajustaba a la curva normal o campana de Gauss, utilizando el método de Peterson. Para Argentina Bosso, citado por Burgos (1963) también comprobó que es posible asumir una distribución normal para el cálculo de probabilidades.

Por lo que si es posible probar la normalidad de las muestras, se puede calcular la fecha antes o después de la cual, se trate de heladas otoñales o primaverales, es probable que ocurran heladas, con una probabilidad determinada, o investigar qué probabilidad de ocurrencia de heladas está

asociada a una determinada fecha, lo cual, por supuesto, también se puede calcular utilizando el método empírico o de frecuencias acumuladas (Burgos, 1963).

2.4.3. ICK de heladas otoñales y primaverales

El índice crikindinoscópico (ICK) de heladas primaverales y otoñales, propuesto por Burgos, sirve para determinar la peligrosidad de éstas, el concepto de peligrosidad de primeras y últimas heladas está relacionado con la sensibilidad de la plantas al momento de ocurrencia de éstas, cuanto mayor es la actividad vegetativa de las plantas más daño provocan las heladas, ya que los tejidos tiernos, con mayor contenido de agua, son más vulnerables al daño por heladas. A su vez el grado de actividad vegetativa de las plantas está relacionado con la temperatura media de la época, ya que mayores temperaturas medias suponen una mayor actividad vegetativa. Al respecto de esto hay autores que determinaron que cuando la temperatura mínima es mayor a 10 °C las plantas estivales comienzan a tener actividad vegetativa, y se dice que son temperaturas activas (Burgos, 1963).

El ICK de las primeras heladas (u otoñales) se considera la temperatura media del aire en la fecha antes de la cual es probable que ocurran heladas con un 20% de probabilidad, lo que equivale a que ocurran en 1 de cada 5 años. De forma equivalente, el ICK de las últimas heladas (o primaverales) se considera a la temperatura media del aire en la fecha después de la cual es probable que ocurran heladas en 1 de cada 5 años. La temperatura media es el promedio de la temperatura máxima y la temperatura mínima diaria (Burgos, 1963).

De esta forma, cuanto mayor resulte el ICK de una localidad, mayor será el daño que provoquen las heladas allí, sobre todo si las demás condiciones climáticas como período libre de heladas sean parecidas (Burgos, 1963).

El valor del ICK de heladas otoñales y primaverales tiene ciertas limitaciones en su uso, ya que en las diferentes regiones climáticas expresa valores que varían pero que no necesariamente implican una diferencia en la peligrosidad de heladas. De todos modos, para el caso del presente trabajo, se puede asumir que la totalidad del territorio de Uruguay se encuentra en una zona del clima húmedo.

Se debe tener en cuenta que en climas con gran variación asincrónica de la temperatura (variación de la temperatura sin periodicidad regular, debida

al pasaje de perturbaciones atmosféricas), el ICK tenderá a ser de mayor valor, comparado con climas de poca variación (Burgos, 1963).

En los climas con gran amplitud térmica diaria (diferencia entre la temperatura máxima y mínima del día), como los desérticos, los valores de ICK serán mayores que los de pequeña variación como los climas húmedos (Burgos, 1963).

Los climas que tienen una gran amplitud anual de variación de la temperatura, como los continentales, y que por lo tanto observan gran tensión térmica en otoño y primavera, tenderán a índices también mayores que los de poca amplitud o tensión térmica como los de localidades próximas al mar (Burgos, 1963).

La expresión “tensión térmica” utilizada por Selianinov, citada por Burgos (1963) se usa en fenología, y es la principal “fuerza” que estimula los procesos fenológicos en las especies perennes.

También, como otra limitante para el uso de ICK de primeras y última heladas, se debe aclarar que la temperatura a la que las plantas comienzan a tener actividad vegetativa no es igual para todas las especies (Burgos, 1963). Para las especies estivales como (por ejemplo *Citrus spp*, tomate, arroz) se puede decir que comienzan a tener actividad vegetativa a partir de los 10 °C, en cambio las especies invernales (por ejemplo trigo, raigrás, cebolla) comienzan a tener actividad vegetativa a partir de umbrales de menor temperatura, cambiando éste dependiendo de la especie y el cultivar.

2.4.4. Período de peligrosidad de heladas primaverales y otoñales

Según Burgos (1963) en la ex Unión Soviética (con un clima continental) se ha desarrollado un criterio distinto a los ICK para determinar la peligrosidad de las heladas primaverales y otoñales. El período de peligrosidad de primeras heladas se define como el número de días entre la fecha media de las primeras temperaturas de 10 °C o menos del año o fin de las temperaturas activas y la fecha media de las primeras heladas. Y el período de peligrosidad de últimas heladas se define como el número de días entre la fecha media de las últimas heladas y la fecha media de las últimas temperaturas de 10 °C o menos, o comienzo de las temperaturas activas de primavera.

2.5. ANTECEDENTES DE ESTUDIOS SOBRE HELADAS EN URUGUAY

En el trabajo de Orecchia (1961) se determinaron las características del régimen de heladas en cada uno de los 11 departamentos estudiados y a los efectos de una mayor generalización, realizó el trazado de cartas nacionales de las fechas medias y extremas, que determinan el período anual con heladas, según el autor con la finalidad simplemente tentativa de establecer diferencias zonales en el país.

En dicho trabajo (Orecchia, 1961) para cada estación meteorológica de referencia se detallaba: 1) período de datos usados, 2) promedio de días con heladas para los meses de mayo a octubre, 3) promedio de días con heladas por año y el desvío estándar, calculado sumando los valores anteriores, 4) porcentaje de heladas tempranas, calculado como el cociente del promedio de día con heladas anteriores al 1 de junio y promedio de días con heladas por año, 5) porcentaje de heladas tardías, usando el promedio de días con heladas después del 31 de agosto, 6) fecha media de la primera helada (FMPH) y su desvío estándar (DE) , 7) fecha media de la última helada (FMUH) y su desvío estándar (DE) y por último la duración media del período anual con heladas (PMCH) y su desvío estándar (DE).

Cuadro No. 5. Parámetros estimados que caracterizan las heladas en Uruguay

| Depto. | FMPH ± DE (días) | FMUH ± DE (días) | PMCH (días) ± DE (días) |
|-------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| Artigas | 16-jun. ± 14 | 15-set. ± 15 | 91 ± 30 |
| Cerro Largo | 29-may. ± 20 | 28-ago. ± 24 | 91 ± 44 |
| Colonia | 24-jun. ± 13 | 20-ago. ± 12 | 57 ± 25 |
| Durazno | 22-abr. ± 12 | 6-oct. ± 14 | 167 ± 26 |
| Maldonado | 16-jun. ± 14 | 22-ago. ± 12 | 67 ± 26 |
| Montevideo | 3-jun. ± 14 | 18-set. ± 16 | 100 ± 30 |
| Paysandú | 19-may. ± 11 | 21-set. ± 21 | 125 ± 32 |
| Rivera | 3-jun. ± 19 | 13-set. ± 18 | 102 ± 37 |
| Salto | 4-may. ± 20 | 20-set. ± 14 | 139 ± 34 |
| Tacuarembó | 7-may. ± 14 | 23-set. ± 20 | 139 ± 34 |
| Treinta y Tres | 13-may. ± 14 | 5-oct. ± 19 | 145 ± 33 |

Fuente: Orecchia (1961).

Castaño et al. (2011) realizaron una caracterización agroclimática del Uruguay, utilizando series de temperatura mínima sobre césped desde 1980 al

2009, de tan sólo tres estaciones meteorológicas del INIA. En el trabajo se explica que, por causa de la variación interanual de la temperatura existe un período en el cual las heladas se manifiestan típicamente en nuestro país, considerándose éste desde el 1 de mayo al 31 de octubre. En este trabajo se caracterizaron las heladas teniendo en cuenta el número de días con heladas agrometeorológicas (que se calcularon con la utilización de una regresión lineal) acumulados anualmente, para el período de mayo a octubre, resultando que este valor varía entre 20 y 25 días en el norte y en el sur del país, y presenta un valor de 35 días para la zona centro.

También en el trabajo de Castaño et al. (2011) se presenta la distribución mensual del régimen de heladas meteorológicas, calculado como la cantidad de días con heladas acumulados mensualmente, siendo el mes de julio en donde se registran el mayor número de días con heladas, de 7 a 11, dependiendo de la zona del país, seguido del mes de junio con 6 a 10 días, agosto con 4 a 8 días, mayo y setiembre con 2 a 6 días y el mes de octubre es el que presenta promedialmente los menores registros, por debajo de 1 día para casi la totalidad del país. En cuanto a la distribución espacial de las heladas durante los distintos meses, ésta mantiene la tendencia mencionada previamente en los totales anuales.

También en el trabajo de Castaño et al. (2011), con el objetivo de representar el comportamiento mensual, tanto espacial como histórico, de los días con heladas de los meses de mayo, julio y octubre, se generaron mapas con isolíneas de los siguientes componentes estadísticos: Percentil 10, Percentil 33, Percentil 50 (Mediana), Percentil 66 y Percentil 90.

Tanto en el trabajos de Orecchia (1961) como en el de Castaño et al. (2011) se consideraron sólo los meses de mayo a octubre para el estudio de las heladas. En Castaño et al. (2011) no se hacer referencia a la importancia del cálculo de la fecha media de primera y última helada. Pueden ocurrir heladas en el mes de abril que se estarían dejando de lado, siendo en estos casos eventos de mayor peligrosidad por la temprana fecha en la que ocurren.

Por otro lado, en el trabajo de Boshell y Chiara (1982) donde aparece un mapa con el período medio libre de heladas, se explica que los mayores valores de dicho período se registran en el sur del Uruguay, donde es superior a 320 días al año; por el contrario hacia el noreste del país se presentan los períodos más cortos libres de heladas, de cerca de 240 días o sea alrededor de ocho meses. Según esta publicación uno de los factores que inciden en que hacia la región noreste del país ocurran las primeras heladas más tempranas y las últimas heladas más tardías, puede ser la influencia del relieve, ya que es posible que ocurra el drenaje de aire frío desde las zonas más altas a las más bajas, donde están ubicadas las estaciones meteorológicas (por ejemplo Melo),

lo que podría influir que las temperaturas mínimas sean inferiores, bajo condiciones de heladas por radiación.

En UdelaR. FA (1986) y en Bossi (1995) también aparecen referencias a las heladas, en este caso se elaboraron mapas, esta vez, si teniendo en cuenta la fecha media de última y primera helada, como factor importante en la determinación del riesgo.

En Bossi (1995) aparecen mapas con isolíneas para: la temperatura media anual, la temperatura máxima media del mes de enero, la temperatura mínima media del mes de julio, el período medio libre de heladas, la fecha media de primera y última helada; para los cuales se usaron datos de 1946 a 1980 y de 1946 a 1990. En el mapa de fecha media de primera helada (elaborado por Chiara, Aramburú, Paradedda) se observa que en cuanto a la fecha media de primera helada las más tempranas se dan en el noreste y litoral oeste del país. Observando el mapa referido a la fecha media de última helada (elaborado por Chiara, Aramburú, Paradedda) también las heladas más tardías se dan en el noreste del país y en el litoral oeste, por lo que en esas zonas del país se da el menor período medio libre de heladas, como muestra el mapa (tomado de Boshell y Chiara, 1982). Observando el mismo mapa se puede ver que el período medio libre de heladas es mayor hacia el sur.

En el trabajo de Corsi y Genta (1992) también aparece una caracterización del evento de las heladas enfocado en la peligrosidad de las heladas tempranas y tardías, en él también se explica que la intensidad de frío que ocurren en un lugar va a depender de: las características de la masa de aire que ingrese al lugar (humedad relativa, temperatura y permanencia) y de condiciones meso y microclimáticas como contenido de agua del suelo, capacidad del suelo para almacenar calor y temperatura el suelo.

En el artículo de Cruz et al. (2000) aparece una caracterización de la zona litoral Centro-oeste, que incluye un enfoque relativo a la fecha de ocurrencia de heladas otoñales y primaverales, procediéndose para el cálculo de probabilidades a la utilización de la distribución empírica de los datos (Villalpando, 1985). Además en este mismo trabajo se menciona el efecto de la continentalidad sobre los eventos de heladas en el país.

La tesis de grado de de Mello (2013) es un estudio climatológico y regionalización de las heladas meteorológicas a nivel nacional, en éste se presentan varios datos de interés con respecto a las heladas meteorológicas, es decir las ocurridas a nivel de casilla, como por ejemplo el período de ocurrencia de heladas para varias estaciones meteorológicas del país, pudiéndose observar que la estación Melo tiene el período más prolongado, y las estaciones meteorológicas ubicadas más al sur tienen períodos más acotados.

2.6. EVENTO JUNIO 2012

Según INTA (2012) la segunda semana de junio del año 2012 una masa de aire polar antártico avanzó desde el sur de Argentina cubriendo a todo el país de Argentina y a Uruguay, siendo un evento inédito por la gran extensión territorial que abarcó, el ingreso de esta masa de aire frío provocó que se registraran las temperaturas más bajas de dicho año. Se puede decir que fue un evento extremo en cuanto a las heladas y en su génesis posee un gran componente advectivo de alcance macrometeorológico.

Según Jornada de Divulgación sobre Daños por Heladas en Citricultura (2012) en el país en un principio el evento fue de tipo advectivo, y luego se formaron heladas de tipo mixtas, ya que primero la masa de aire frío ingreso provocando una baja generalizada de la temperatura y heladas de tipo advectivas, a las que luego le siguieron heladas de tipo mixtas, ya que los débiles balances térmicos locales fueron suprimidos debido a las perdidas por radiación, llevando a la formación de más heladas, por lo que el evento se perpetuó por varios días seguidos.

Según INTA (2012) las bajas temperaturas provocaron nevadas en varias localidades de la provincia de Buenos Aires, La Pampa, Córdoba, San Luis y en ciudades de la República Oriental del Uruguay.

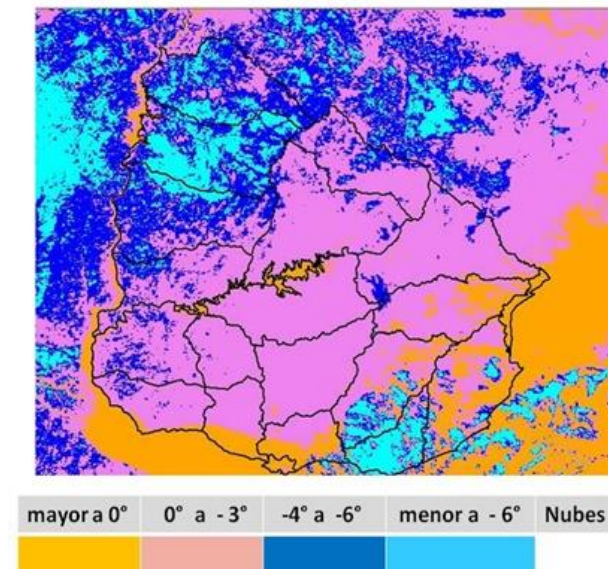
También según INTA (2012), Jornada de Divulgación sobre Daños por Heladas en Citricultura (2012) las heladas meteorológicas ocurridas el 7, 8 y 9 de junio en Argentina fueron excepcionales por haberse producido antes de la fecha media de la primera helada meteorológica y también porque se dieron durante tres días consecutivos. En la región del río Uruguay, estas heladas provocaron graves daños a la producción tanto citrícola y forestal, registrándose pérdidas de hasta el 80% por caída de frutos cítricos, y pérdida totales en plantaciones jóvenes de eucalipto.

Según INTA (2012) en Uruguay se registraron temperaturas mínimas de -5,6 °C en Salto, superando el récord de mínima, y -7 °C en Tacuarembó.

En las Imágenes No. 1 y 2 se muestra la temperatura de superficie, estimada a partir de imágenes satelitales, que ocurrió durante los días 7 y 8 de junio de 2012 en el país, en ellas se puede observar que las heladas de mayor intensidad ocurrieron al norte del Río Negro.

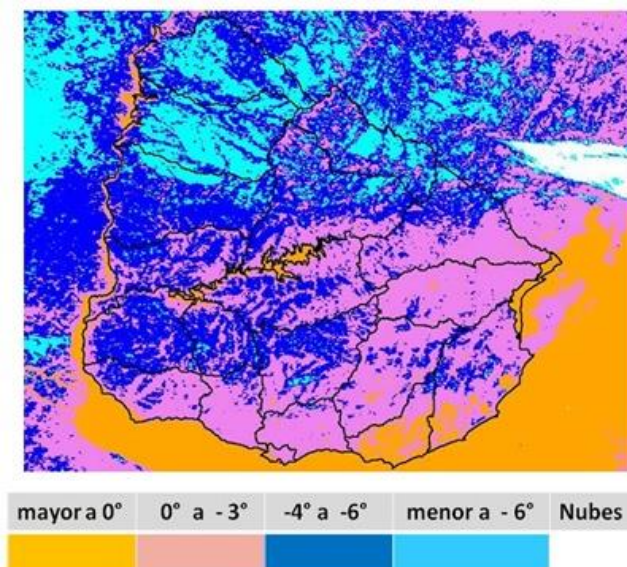
En las Fotos No. 1 y 2, se muestra una plantación de *Eucalyptus globulus spp. globulus*, antes y después del evento de heladas del 2012, se ve que luego del evento los árboles aparecen senescentes; esta plantación había sido instalada en noviembre del 2011.

Imagen No. 1. Temperatura de superficie del día 7 de junio de 2012 a las 05:03 horas



Fuente: Jornada de Divulgación sobre Daños por Heladas en Citricultura (2012).

Imagen No. 2. Temperatura de superficie del día 8 de junio de 2012 a las 04:40 horas



Fuente: Jornada de Divulgación sobre Daños por Heladas en Citricultura (2012).

Foto No. 1. Plantaciones de *E. globulus* spp. *globulus* en el departamento de Lavalleja antes del evento extremo de helada de junio de 2012



Foto No. 2. Plantaciones de *E. globulus* spp. *globulus* en el departamento de Lavalleja después del evento extremo de helada de junio de 2012



3. MATERIALES Y MÉTODOS

Los pasos generales para la realización del régimen agroclimático de heladas para Uruguay fueron: primero la recopilación de datos meteorológicos, luego la selección preliminar de los datos a utilizar, que fue seguida por el control de calidad del total de datos de cada serie, y por último se procedió con el análisis de los datos (cálculo de diferentes parámetros estimados y otros valores de interés) y la elaboración de los diferentes productos (cuadros y mapas).

Además se presentaron diferentes métodos para el cálculo de probabilidad de ocurrencia de heladas y sus aplicaciones.

Por último se incluyó un análisis descriptivo del evento extremo de heladas de junio 2012.

3.1. RECOPIACIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS

Las fuentes de información fueron el Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET), el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) y la Facultad de Agronomía (UdelaR. FAgro).

Se recopilaron datos de las variables: temperatura mínima diaria, temperatura máxima diaria y precipitación acumulada diaria, ya que aunque el trabajo está centrado en el análisis de la temperatura mínima diaria, se consideró importante además recopilar datos de temperatura máxima y precipitación diarios para un análisis más completo del comportamiento de la temperatura en cada día, que fue de gran utilidad para realizar el proceso de control de calidad de los datos.

Las series originales contaban con diferentes períodos de datos, comprendidos entre los años 1965 y 2015.

3.2. SELECCIÓN PRELIMINAR DE LOS DATOS A UTILIZAR

En este paso se descartaron series de datos por diferentes motivos. Las series que se apartaron fueron: Colonia (INUMET), debido a que no era representativa de las condiciones de la producción agrícola y forestal, porque la ubicación de la estación es muy próxima a la costa del Río de la Plata; INIA Tacuarembó, debido a inconsistencias encontradas en las series y porque

abarcaba un número insuficiente de años; y Treinta y Tres (INUMET), debido a que presentaba muchos datos faltantes.

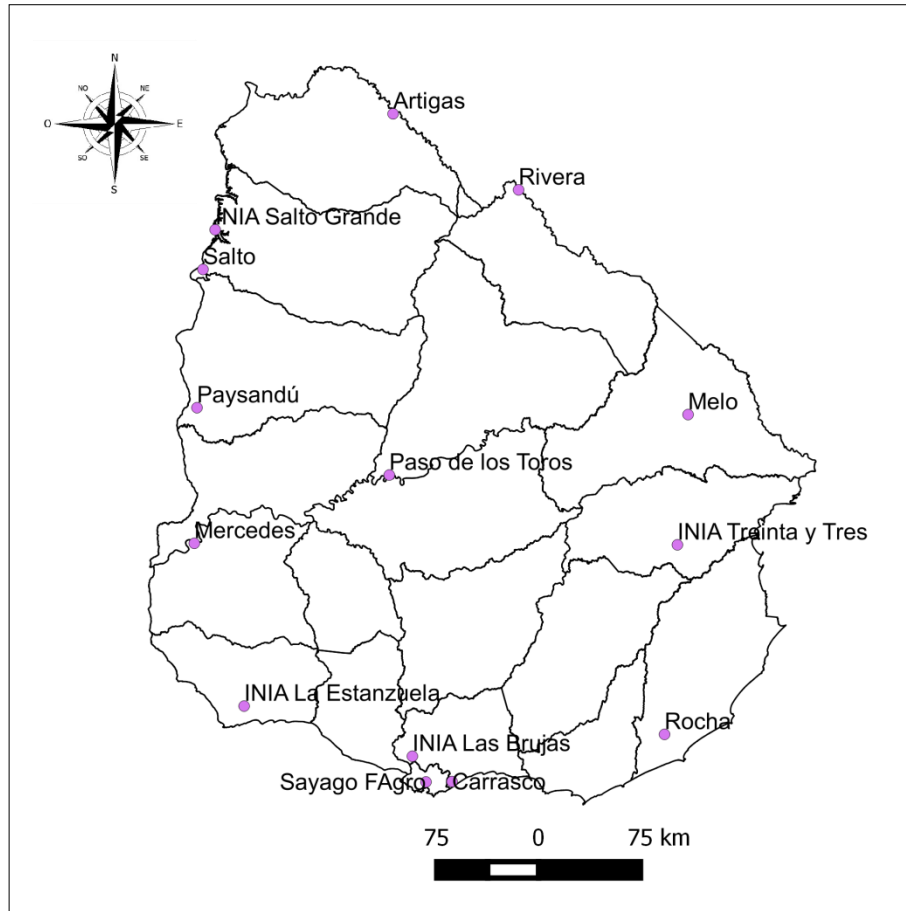
Luego de la selección preliminar se decidió que se utilizarían 14 series de datos de diferentes estaciones meteorológicas en el período comprendido entre 1981 y 2013 (abarcando 33 años), ya que éste es un período común a todas las series. Las series de estaciones meteorológicas del INUMET que se usaron fueron: Artigas, Aeropuerto de Carrasco, Melo, Mercedes, Paso de los Toros, Paysandú, Rivera, Rocha y Salto; del INIA se usaron las series de las estaciones meteorológicas: La Estanzuela, Las Brujas, Salto Grande y Treinta y Tres; y por último de la FAgro se usó la serie de datos de la estación Sayago.

En la Mapa No. 1 se muestra el mapa del país con la ubicación de las diferentes estaciones meteorológicas, que fue creado utilizando el programa QGIS a partir de un mapa elaborado previamente en Google Earth, de acuerdo a las coordenadas de las estaciones meteorológicas que aparecen en el Cuadro No. 6.

Cuadro No. 6. Coordenadas de las estaciones meteorológicas (grados sexagesimales, decimales) y altitud (m s.n.m)

| Estación | Latitud | Longitud | Altitud (m s.n.m.) |
|---------------------|----------|----------|--------------------|
| Artigas | -30,3983 | -56,51 | 120 |
| Carrasco | -34,8333 | -56,0117 | 33 |
| Melo | -32,3517 | -54,1933 | 100 |
| Mercedes | -33,25 | -58,0683 | 17 |
| Paso de los Toros | -32,80 | -56,5267 | 76 |
| Paysandú | -32,3483 | -58,0367 | 61 |
| Rivera | -30,8967 | -55,5433 | 242 |
| Rocha | -34,4933 | -54,3117 | 18 |
| Salto | -31,4367 | -57,98 | 41 |
| Sayago FAgro | -34,8369 | -56,2225 | 30 |
| INIA La Estanzuela | -34,3333 | -57,6833 | 81 |
| INIA Las Brujas | -34,6667 | -56,3333 | 32 |
| INIA Salto Grande | -31,2667 | -57,8833 | 50 |
| INIA Treinta y Tres | -33,2333 | -54,25 | 100 |

Mapa No. 1. Ubicación de estaciones meteorológicas



Fuente: elaboración en QGIS.

Como se puede observar en el Cuadro No. 7 en cuatro estaciones meteorológicas: Carrasco, Paso de los Toros, Rivera y Artigas, existen períodos de datos faltantes muy prolongados entre los años 1981 y 2013, pero igual se decidió incluirlas por ser puntos muy importantes para la caracterización espacial de las heladas en el país. La estación Rivera estuvo cerrada durante el período 1985 a 1989 (de Mello, 2013). En la serie de la estación Carrasco se decidió eliminar el año 2013 ya que no contaba con los datos de temperatura mínima en todos los días de los meses de agosto a noviembre. De las estaciones meteorológicas Artigas y Paso de los Toros no se pudo precisar la causa de la falta de datos.

Cuadro No. 7. Fechas de comienzo y fin de series de temperatura mínima diaria y los períodos con datos faltantes

| Estación | Comienzo y fin de series de temp. mín. | | Período de datos faltantes de temp. mín. |
|---------------------|--|------------|--|
| Artigas | 01/01/1981 | 31/12/2013 | 2001 a 2005 |
| Carrasco | 01/01/1970 | 31/12/2013 | 2013 |
| Melo | 01/01/1981 | 31/12/2013 | |
| Mercedes | 01/01/1981 | 31/12/2013 | |
| Paso de los Toros | 07/01/1970 | 31/12/2013 | 1996 a 2009 |
| Paysandú | 01/01/1981 | 31/12/2013 | |
| Rivera | 01/01/1981 | 31/12/2013 | 1985 a 1989 |
| Rocha | 01/01/1970 | 31/12/2013 | |
| Salto | 01/01/1981 | 31/12/2013 | |
| Sayago FAgro | 01/01/1981 | 01/02/2015 | |
| INIA treinta y Tres | 01/05/1971 | 09/10/2014 | |
| INIA La Estanzuela | 01/07/1965 | 01/03/2015 | |
| INIA Las Brujas | 01/07/1972 | 03/03/2015 | |
| INIA Salto Grande | 01/07/1970 | 04/03/2015 | |

3.3. CONTROL DE CALIDAD DE LOS DATOS

El control de calidad se realizó para el total de los datos de cada serie (períodos comprendidos entre los años 1965 y 2015) y para todas las variables, lo que generó como producto intermedio del trabajo series con control de calidad, que quedan disponibles para posteriores investigaciones.

Para el análisis de los datos, propiamente de la tesis, se utilizó sólo el período comprendido entre 1981 y 2013, el cual abarca 33 años, por lo que es adecuado para una caracterización climática, aunque por supuesto cuanto mayor sea la cantidad de años incluidos en el análisis más certera resulta la caracterización.

Cuando se trabaja con series climáticas es importante realizar un control de calidad de los datos ya que esto es un prerrequisito para un posterior análisis de los datos válido y por lo tanto para la generación de información climática útil.

Con el control de calidad se trata de identificar, documentar y suprimir los errores de datos puntuales (por ejemplo errores tipográficos del proceso de registro, datos faltantes por ruptura del instrumento, datos atípicos extremos) para así poder asegurar que la serie está razonablemente libre de errores graves, también con el control de calidad se pretende garantizar la coherencia interna, temporal y espacial de los datos de la serie (Aguilar 2013, Skansi et al. 2013).

Para hacer el control de calidad de las series se utilizó el software estadístico de libre acceso R y el código o paquete ClimDex (1.0), éste último fue creado para el control de calidad y para detectar señales de Cambio Climático en series climáticas. Este mismo programa fue utilizado en otros trabajos con series climáticas como el de de Mello (2013). Este software fue desarrollado por el ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) y se accede libremente en: <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDI/software.shtml>.

Para el control de calidad de las series se ejecutaron dos rutinas en lenguaje R, la rutina QC (“Quality Control”) y la Extra_QC (también software de acceso libre en: <http://www.c3.urv.cat/data1.html>), éstas devuelven carpetas con documentos que muestran los posibles errores que fueron detectados en las series, luego de esto el proceso de control de calidad sigue con la acción de validar o corregir los resultados de las rutinas usando diferentes recursos que se mencionaran más adelante (Skansi et al., 2013).

Los documentos que surgen luego de realizar la rutina QC son 3 archivos que son creados en un sub directorio llamado “log”, éstos se nombran como: estación_temQC.csv, estación_prpcQC.csv y estación_tepstdQC.csv. Siendo “estación” el nombre ingresado en el programa para cada estación (CIIFEN, 2004).

Los primeros dos archivos contienen información sobre valores no razonables para la temperatura y precipitación respectivamente, esto incluye datos de fechas con temperaturas mínimas mayores o iguales a la máxima, y precipitaciones negativas (CIIFEN, 2004).

El documento estación_tepstdQC.csv incluye posibles valores extremos de la temperatura diaria, tanto mínima como máxima, junto con las fechas en las que ocurrieron; también se adiciona el dato de “dtr” que es la amplitud térmica diaria, es decir la diferencia entre la temperatura máxima y mínima diaria (CIIFEN, 2004). En Anexo No. 1 aparece este archivo correspondiente a la estación Melo.

Además luego de correr la rutina QC surgen en la misma carpeta “log” 4 archivos en formato pdf con gráficas que también se utilizan en el proceso de control de calidad (CIIFEN, 2004).

Los documentos que surgen luego de realizar la rutina Extra_QC son 3 archivos gráficos y 8 archivos de texto que se generan en una carpeta llamada "extraqc" (Aguilar et al., 2010).

Uno de los archivos gráficos que surge es estación_boxes.pdf, que contiene diagramas box-plot mensuales para el conjunto de la serie, para precipitación por encima de 0 mm, temperatura máxima diaria, temperatura mínima diaria y "dtr". En este diagrama aparecen identificados en forma de círculos aquellos valores que superan el tercer cuartil más 3 veces el rango intercuartílico, en los casos de temperaturas mínimas y máximas diarias (y 5 veces en precipitación) y los que no alcanzan el primer cuartil menos 3 veces el rango intercuartílico (5 en precipitación). Los datos así resaltados representan "outliers" o valores extremos y su localización concreta, habitualmente evidente precisamente por su singularidad, puede obtenerse a partir de la inspección del archivo estación_outliers.txt (Aguilar et al., 2010). En el Anexo No. 2 aparece este archivo correspondiente a la estación Melo.

El archivo estación_boxseries.pdf muestra un diagrama de caja para las mismas variables pero graficado como series anuales. Por último en el archivo estación_rounding.pdf muestra la cantidad de valores decimales que tienen los datos de las series, lo cual permite comprobar si las series están redondeadas ejemplo al entero o con un decimal, etc.; en precipitación se omiten los valores 0 (Aguilar et al., 2010).

De los 8 archivos de texto ya se mencionó a estación_outliers.txt que es un conjunto de los valores observados determinados como extremos según las especificaciones indicadas en el primer gráfico. El archivo estación_duplicates.txt muestra las fechas duplicadas. El archivo estación_tmaxmin.txt es un conjunto de registros en los que la temperatura máxima es inferior o igual a la mínima. El archivo estación_tn_flatline.txt es un conjunto de valores de temperatura mínima que aparecen en rachas de al menos tres valores consecutivos idénticos (se excluye la precipitación 0), es decir se identifican rachas excesivamente largas de valores iguales. El archivo estación_tx_flatline.txt es análogo al anterior pero para temperatura máxima. El archivo estación_tn_jumps.txt es un conjunto de valores de diferencias en la temperatura mínima en 2 días consecutivos superiores a 20 °C. El archivo estación_tx_jump.txt es análogo al anterior pero para datos de máxima. Y por último el archivo estación_toolarge.txt es un conjunto de valores considerados excesivamente elevados, como temperaturas mayores a 50 °C y precipitaciones mayores a 200 mm diarios (Aguilar et al., 2010).

Para la validación o corrección de los datos que surgieron como posibles errores, luego de realizarse las rutinas de control de calidad, se utilizaron diferentes recursos como: observar series de localidades cercanas;

recopilar datos del archivo del INUMET y series del INIA corregidas; y revisar series a las cuales ya se les había realizado un control de calidad.

También para la validación o corrección de los datos de temperatura se tuvo en cuenta los datos de precipitación, por ejemplo si existía un salto de temperatura muy brusco de un día a otro, podía deberse a que fue un día caluroso y húmedo al que le siguió lluvia y un descenso de la temperatura; y también se utilizaron datos de heliofanía, de las estaciones meteorológicas del INIA, cuando estaba disponible este dato, para el análisis de los casos de días con temperatura mínima y máxima iguales, ya que se podía tratar de días totalmente nublados en los cuales la temperatura se puede mantener casi sin cambios.

Hubo 3 series: INIA Treinta y Tres, INIA Las Brujas e INIA La Estanzuela; en las que en un principio no corrió completamente la rutina Extra_QC, sólo se pudo revisar los “outliers” y faltó revisar los archivos de: “faltlines”, “jumps” y “toolarge”. De todos modos se completó el análisis Extra_QC utilizando una planilla de cálculo elaborada especialmente para dicha tarea. Finalmente se descubrió que la razón por la cual no corría el Extra_QC era debido a que las series presentaban datos redondeados con hasta tres decimales lo cual generaba un error en el programa, problema que se solucionó redondeando las series al decimal.

Luego de realizar el control de calidad de los datos es posible que sea necesaria una homogeneización de las series. El objetivo de la homogeneización de una red regional de series climáticas es lograr que sus fluctuaciones se relacionen únicamente con fluctuaciones reales del clima y que esté libre de sesgos artificiales, para que así las series sean comparables (Aguilar, 2013).

Para realizar la homogeneización es importante disponer de metadatos, es decir la historia de las estaciones, ya que posibles causas de falta de homogeneidad, que causan cambios abruptos son por ejemplo: la relocalización de la estación, cambios de instrumentos (por ejemplo al pasar de manual a automática), cambios de exposición del instrumento, cambios en el cómputo de datos, operaciones de mantenimiento; también hay causas de falta de homogeneidad que generan cambios graduales como por ejemplo: la urbanización, crecimiento de vegetación alrededor de la estación, descalibraciones, disfunciones progresivas del instrumento de medición y desgaste de la garita meteorológica (Aguilar, 2013).

Para este trabajo, la homogeneización no se realizó porque no se contaba con metadatos de las estaciones meteorológicas que justifiquen su ejecución.

3.4. ANÁLISIS DE LOS DATOS

3.4.1. Selección de umbrales de temperatura mínima

Como ya se explicó, Alarcón Velazco y Trebejo Varillas (2010) proponen realizar los cálculos para caracterizar las heladas utilizando umbrales de temperaturas mínimas medidas en casilla de: -6 °C, -3 °C, 0 °C, 3 °C y 6 °C, esto logra caracterizar las heladas teniendo en cuenta la diferencia que existe en la temperatura mínima con la altura, durante las noche de heladas, para así poder elegir un umbral que permita evaluar los posibles daños al cultivo, teniendo en cuenta la altura de éste y su umbral de daño.

Por esto, en forma análoga que en el Alarcón Velazco y Trebejo Varillas (2010) para el presente trabajo, para caracterizar las heladas del Uruguay, usando datos de temperatura mínima medida en casilla a 1,5 m del suelo, se decidió que se estudiarían los umbrales de: -4 °C, -2 °C, 0 °C, 2 °C y 4 °C.

Según la bibliografía revisada se puede suponer que en promedio, una temperatura mínima medida en casilla de 4 °C puede significar una temperatura mínima de 0 °C sobre el suelo (suponiendo una diferencia de 4 °C entre la temperatura medida en casilla a 1,5 m y la registrada sobre el césped a 0,05 m), y si el cultivo evaluado presenta una altura cercana al suelo y un umbral de daño de 0°C, se puede considerar la caracterización de heladas realizada con temperaturas menores o iguales a 4 °C medidas en casilla, es decir la caracterización de las heladas realizadas con el umbral 4 °C.

En base a la bibliografía consultada y teniendo en cuenta que el presente trabajo tiene un enfoque forestal, se muestra a continuación un cuadro guía sobre los umbrales de temperaturas mínimas medidas en casilla que pueden significar un umbral de daño a la altura de los cultivos, teniendo en cuenta las dos especies de eucalipto más plantadas en el país: *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus globulus*.

En el Cuadro No. 8 se puede observar que por ejemplo teniendo en cuenta la especie forestal más sensible a las heladas, *E. grandis*, y sabiendo que su temperatura crítica de daño, sin un proceso de endurecimiento previo, es de -2 °C, y suponiendo que se dé a nivel de suelo; el umbral a nivel de casilla que debe tenerse en cuenta es el de 2 °C, ya que la diferencia en la temperatura mínima a nivel de suelo y a nivel de casilla es de 4 °C aproximadamente según la bibliografía revisada. Además se presenta el caso de que el cultivo se encuentre a una altura de 0,5 m, y sabiendo que la diferencia en la temperatura mínima medida a 0,5 m y en casilla (a 1,5 m) es de 2 °C, en ese caso se debe tener en cuenta el umbral 0 °C.

Cuadro No. 8. Cuadro explicativo con temperaturas críticas de *E. grandis* y *E. globulus* a diferentes alturas: en la planta (a 0,05 m), en casilla (a 1,5 m) y a 0,5 m del suelo

| Especie | Temperatura crítica (°C) | | |
|--|--------------------------|-----------------|-------------|
| | Planta a 0,05 m | Casilla a 1,5 m | A 0,5 m |
| <i>E. grandis</i> (sin endurecimiento) | -2 | 2 | 0 |
| <i>E. grandis</i> (con endurecimiento) | -4,7 | -0,7 | -2,7 |
| <i>E. globulus</i> | -4,5 a -7,5 | -0,5 a -3,5 | -2,5 a -5,5 |

Fuente: elaboración propia a partir de valores citados en la revisión bibliográfica de Pitz Floriani et al. (2013) para *E. grandis* y Gallino et al. (2007) para *E. globulus*.

3.4.2. Cálculos y presentación de los resultados

Para cada una de las estaciones meteorológicas se realizó la caracterización del régimen de heladas. Luego se integraron todos los resultados de los parámetros estimados y otros valores en cuadros y mapas, para dar una caracterización a nivel nacional. Esto permite comparar los resultados en las diferentes estaciones meteorológicas del país en estudio, y visualizar las tendencias espaciales en el territorio nacional y las tendencias temporales del comportamiento de las bajas temperaturas en el país.

Para la mayoría de las series se contaba con 33 años de datos continuos, de 1981 a 2013 inclusive, excepto para algunas series en las que había datos faltantes, como ya se mencionó anteriormente.

Para la realización de los cálculos de los parámetros estimados y los otros valores de interés, que componen el régimen agroclimático de heladas se utilizaron planillas de cálculo, y el programa de estadística, de libre acceso, R.

Los cálculos incluyen una caracterización general térmica y una caracterización exclusivamente en cuanto a las heladas tanto de parámetros medios estimados como valores extremos. También se incluyen las estimaciones de los parámetros de peligrosidad de heladas otoñales y primaverales. Todas estas estimaciones de los parámetros poblacionales (incluidos los valores extremos) de interés se listan en forma ordenada más adelante y son estimaciones del comportamiento del clima en cada localidad.

Las probabilidades de fechas de ocurrencia de primeras y últimas heladas fueron estimadas por el método de frecuencias acumuladas, por ejemplo para el caso del cálculo de ICK.

Los mapas del régimen agroclimático de heladas fueron elaborados usando el programa QGIS que es un “software” de Sistemas de Información Geográfica de código abierto, con licencia GNU (“General Public License”), además se puede mencionar que es un proyecto oficial de “Open Source Geospatial Foundation” (OSGeo) y se puede bajar desde www.qgis.org.

En un principio se ingresaron las coordenadas de cada una de las estaciones meteorológicas en el programa Google Earth, luego desde el QGIS se importaron esos puntos y se creó un archivo vectorial de puntos. Luego se editó dicha capa y se le agregó a la tabla de atributos los diferentes parámetros estimados a mapear: porcentaje de años con heladas, fecha media de primera helada, fecha media de última helada, período medio con heladas y período medio libre de heladas.

Para la creación de los mapas con isolíneas se realizó una interpolación usando el método de ponderación inversa a la distancia, con el cual se creó una capa raster, a partir de la cual se trazaron las isolíneas.

Se debe aclarar que en los mapas aparece un punto para la separación decimal y no una coma, ya que el programa QGIS estaba predeterminado así y no se podía modificar.

Como caracterización general de la temperatura en cada estación se estimaron los siguientes parámetros:

- Temperatura máxima media (TXM) (°C): promedio de la temperatura máxima de todos los días del año, de todos los años de la serie.
- Temperatura mínima media (TNM) (°C): promedio de la temperatura mínima diaria de todos los días del año, de todos los años de la serie.
- Temperatura media anual (TM) (°C): promedio de la temperatura media diaria, calculada como el promedio de la temperatura máxima y la temperatura mínima de todos los días del año, de todos los años de la serie.
- Temperatura máxima media del mes de enero (TXM enero) (°C): promedio de las temperaturas máximas diarias del mes de enero de todos los años de la serie.
- Temperatura mínima media del mes de julio (TNM julio) (°C): promedio de las temperaturas mínimas diarias del mes de julio de todos los años de la serie.
- Temperatura mínima anual media (TNAM) (°C): promedio de las temperaturas mínimas absolutas de cada año de la serie, de todos los años de la serie.
- Temperatura mínima absoluta (TNabs.Histo.) (°C): mínima histórica de todos los años de la serie.

Como caracterización del régimen agroclimático de heladas se realizaron las estimaciones para cada estación meteorológica y cada umbral (-4 °C; -2 °C; 0 °C; 2 °C y 4 °C) de los siguientes parámetros medios:

- Porcentaje de años con heladas (%AcH): cociente entre los años con heladas y los años con datos de la serie.
- Fecha media de primera helada (FMPH): es la media aritmética de las fechas de primeras heladas de cada uno de los años de la serie.
- Desviación estándar de fecha media de primera helada (DE) (días).
- Fecha media de última helada (FMUH): es la media aritmética de las fechas de últimas heladas de cada uno de los años de la serie.
- Desviación estándar de fecha media de última helada (DE) (días).
- Período medio con heladas (PMCH) (días): es la cantidad de días desde la fecha media de la primera helada hasta la fecha media de la última helada:

$$PMCH = FMUH - FMPH + 1$$

- Período medio libre de heladas (PMLH) (días): es el resto de los días del año:

$$PMLH = 365 - PMCH$$

Como caracterización del régimen agroclimático de heladas se realizaron las estimaciones para cada estación meteorológica y cada umbral (-4 °C; -2 °C; 0 °C; 2 °C y 4 °C) de los siguientes valores extremos:

- Fecha extrema de primera helada (FEPH): es la fecha de ocurrencia de primera helada más temprana que haya sido registrada en la serie de años considerada.
- Fecha extrema de última helada (FEUH): es la fecha de ocurrencia de última helada más tardía que se haya registrado en la serie de años considerada.
- Período con heladas extremo (PECH) (días): es la cantidad de días desde la fecha extrema de la primera helada hasta la fecha extrema de la última helada, es decir, el mayor período con heladas que haya ocurrido en cada estación meteorológica.
- Período libre de heladas extremo (PELH) (días): es el resto de los días del año, es decir, el menor período libre de heladas que haya ocurrido cada estación meteorológica.

Para caracterizar la peligrosidad de las heladas otoñales y primaverales en cada estación se calcularon los ICK de primeras y últimas heladas, utilizando el método de frecuencias acumuladas, y los períodos de peligrosidad, siendo:

- ICK de primeras heladas (ICK P) (°C): temperatura media diaria del aire correspondiente a la fecha hasta la cual ocurren heladas con un 20% de probabilidad.
- ICK de últimas heladas (ICK U) (°C): temperatura media diaria del aire correspondiente a la fecha a partir de la cual ocurren heladas con un 20 % de probabilidad.
- Fecha media de ocurrencia de primeras temperaturas mínimas de 10 °C o menores (FMP10): es la media aritmética de las fechas de primeras temperaturas menores o iguales a 10 °C, de todos los años de la serie considerada.
- Fecha media de ocurrencia de últimas temperaturas mínimas de 10 °C o menores (FMU10): es la media aritmética de las fechas de últimas temperaturas menores o iguales a 10 °C, de todos los años de la serie considerada.
- Período de peligrosidad medio de primeras heladas (Ppeli.P) (días): período en días desde la fecha media de primeras temperaturas iguales o inferiores a 10 °C hasta la fecha media de primera helada.
- Período de peligrosidad medio de últimas heladas (Ppeli.U) (días): período en días desde la fecha media de última helada hasta la fecha media de las últimas temperaturas iguales o inferiores a 10 °C.

3.4.3. Cálculo de probabilidades por el método de frecuencias acumuladas

Se realizó la estimación de probabilidades de ocurrencia de primeras y últimas heladas por el Método de frecuencias acumuladas o método empírico (se usa la distribución empírica de los datos) que es utilizado en Villalpando (1985), Cruz et al. (2000), García et al. (2014), UdelaR. FA (2014).

Cuando se calculan las probabilidades para las primeras heladas las fechas se ordenan en forma creciente, desde la más temprana hasta la más tardía, y se les asigna un número de orden (K) a cada una.

El cálculo de probabilidad se realiza por la siguiente fórmula, de modo que la menor probabilidad quede asociada a la fecha más temprana:

$$FA_t = \left[\frac{K}{(m + 1)} \right] \cdot \left(\frac{m}{n} \right)$$

Siendo: FAt la probabilidad total de ocurrencia de heladas o la frecuencia acumulada total hasta la fecha correspondiente; m el número de años con heladas de la serie y n el número total de años de la serie.

Como se puede observar en la fórmula, la probabilidad de ocurrencia puede ser corregida por el factor m/n , que es el cociente entre el número de años con heladas de la serie (m) y el número de años de la serie (n), ya que no siempre todos los años tienen registros de heladas (García et al., 2014).

Cuando se repiten fechas de primera helada en diferentes años se calculan igual la FAt para las dos fechas, asignando números de orden consecutivos, pero sólo se considera válida la mayor probabilidad asociada a esa fecha.

Si se está calculando el ICK para heladas otoñales (ICK P), a través de este método, lo primero que se debe encontrar es la fecha hasta la cual ocurren heladas con un 20 % de probabilidad o 1 vez cada 5 años (Fecha primera 20%). Si la fecha correspondiente al 20% de probabilidad se encuentra entre dos fechas, la misma puede estimarse por interpolación lineal como se muestra en UdelaR. FA (2014).

Como el ICK de heladas otoñales (o primeras) es la temperatura media diaria del aire correspondiente a la fecha hasta la cual ocurren heladas con un 20 % de probabilidad, y ya se tiene definida la fecha, y como contamos con datos diarios de temperatura media (promedio entre la temperatura máxima y mínima), se toman los datos de dicha fecha, de todos los años de la serie, y se promedian, siendo este valor el ICK.

Para calcular el ICK de heladas primaverales (o últimas) (ICK U), se procede de forma similar, pero se ordenan las fechas en forma decreciente, desde la más tardía a la más temprana, de modo que, en este caso, la menor probabilidad quede asociada a la fecha más tardía. Se define el ICK de heladas primaverales como la temperatura media diaria del aire correspondiente a la fecha a partir de la cual ocurren heladas con un 20% de probabilidad o 1 vez cada 5 años (Fecha última 20%).

El criterio de redondeo para primeras heladas es siempre por defecto y para últimas heladas es siempre por exceso ya que se asume el criterio del mínimo riesgo, tanto para calcular la fecha media de primeras y últimas heladas, como fechas asociadas a diferentes probabilidades.

3.4.4. Prueba de normalidad de fecha de ocurrencia de primeras y últimas heladas

Se realizó una prueba de normalidad para determinar si la distribución de las muestras de fechas de primera y última helada, por separado, se ajustan a un modelo de distribución normal o de campana de Gauss.

Primero se debe aclarar que, por un lado la prueba se le realizó a la muestra de fechas de primeras heladas de una determinada estación meteorológica y un determinado umbral y por otro lado, separado, se realizó la prueba a las muestra de fechas de últimas heladas de la misma estación y umbral; luego este proceso se repitió para todos los umbrales considerados y todas las estaciones meteorológicas, ya que cada una de las muestras proviene de una población diferente.

También se debe aclarar que la variable “días” (fechas) es una variable discreta y no continua, y por lo tanto sería un modelo de distribución normal aproximada. En este caso podría considerarse en vez de “días” el “tiempo” que si es una variable continua.

Además en el caso de las fechas de ocurrencia de primeras y últimas heladas, se ajustaría a una curva normal truncada, no infinita. De todos modos se realizó la prueba, para todos los umbrales y para todas las estaciones meteorológicas.

La prueba que se utilizó fue la Shapiro-Wilk, que es adecuada para muestras pequeñas, menor a 30 datos, y se utilizó el programa R para su realización. Para que la prueba se ejecute es necesario tener 3 o más datos.

El test de normalidad de Shapiro-Wilk concluye que los datos no provienen de una variable normalmente distribuida, si el p.valor es menor o igual al nivel de significancia seleccionado ($\alpha=0,05$). Si no se rechaza la hipótesis nula de normalidad (p.valor mayor a 0,05), se puede tomar al modelo normal como una aproximación razonable. Por lo tanto, se pueden realizar estimaciones de probabilidades asumiendo normalidad, como se explica en Burgos (1963), Villalpando (1985), UdelaR. FA (2014).

Los resultados se presentan en cuadros y también se muestran gráficas con la distribución de las muestras, sobre las cuales se trazó la curva normal teórica de cada una. Dichas gráficas fueron elaboradas en el programa R y la separación decimal es un punto y no una coma.

3.4.5. Cálculo de probabilidades asumiendo una distribución normal

Para las muestras de fechas de primeras y últimas heladas en las que se demostró que se ajustan a un modelo normal aproximado, se permite el cálculo de probabilidades asumiendo una distribución normal, como ya se mencionó.

La probabilidad se puede calcular integrando (hallando el área bajo la gráfica) la función de densidad (frecuencia relativa). Para hallar estas probabilidades, en una función de distribución normal, de una forma rápida y sencilla, se usa la función estándar Z.

Si se tienen una variable X con una distribución normal $N(\mu, \sigma^2)$ es posible obtener la forma estandarizada haciendo la transformación:

$$z_i = \frac{(x_i - \mu)}{\sigma}.$$

Z se distribuye normal $N(0,1)$, es decir Z tiene una distribución Normal estandarizada. La importancia de esta distribución se debe a que las probabilidades bajo la curva se encuentran en tabla, la tabla del área de la distribución normal estándar o tabla de z.

De este modo cualquier posible valor (x_i) de una variable aleatoria que tenga varianza distinta de 0, finita y media también finita, se lo puede transformar a su correspondiente valor (z_i) de tal forma que el área (o probabilidad) entre dos puntos x_0 y x_1 será igual al área entre z_0 y z_1 :

$$P(x_0 < x_i < x_1) = P\left(\frac{(x_0 - \bar{x})}{s} < z_i < \frac{(x_1 - \bar{x})}{s}\right)$$

En este caso se estimaron los parámetros muestrales con el programa R: la media muestral de las fechas de primeras o últimas heladas (\bar{x}) y el desvío estándar muestral (s), sabiendo que:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{m}$$
$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{m - 1}}$$

Luego se aplican las siguientes ecuaciones:

$$z_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{s}$$

$$x_i = \bar{x} + z_i s$$

Siendo: x_i cada valor de la muestra, es decir cada fecha de ocurrencia de primera o última helada y z_i variable estandarizada.

Para estos casos se procede de tal modo que, con el dato de la probabilidad en estudio (P_z) se ingresa al cuerpo de la tabla del área de la distribución normal estándar o tabla de z (Anexo No. 5), y se extrae el valor de z_i en los ejes, a partir del cual se calcula x_i , que corresponde a la fecha buscada.

Por otro lado, para saber la probabilidad total (P_t) de que ocurra helada un año y que la primera helada ocurra en una determinada fecha o antes (para el caso de primeras heladas), se analizó como un caso de probabilidad condicionada, es decir la probabilidad de que ocurra un evento B, sabiendo que también sucede otro evento A. Se escribe $P(B/A)$, y se dice que es la probabilidad de B dado A (Meyer, 1983):

$$P(B/A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)}, \text{ dado que } P(A) > 0$$

En este caso A sería la probabilidad de que en un año ocurran heladas; y B/A sería la probabilidad de que, dado que en un año ocurra helada, la primera helada ocurra en tal fecha o antes (para el caso de primeras heladas).

Para el caso de últimas heladas, B/A sería la probabilidad de que, dado que en un año ocurra helada, la última helada ocurra en tal fecha o después.

Despejando de la ecuación anterior, la intersección de los dos eventos, o sea la probabilidad total (P_t), se calcula multiplicando las probabilidades de B/A y A:

$$P(B \cap A) = P(B/A) \cdot P(A)$$

Tal que:

$$P_t = P_z \cdot \frac{m}{n}$$

La $P(B/A)$ es la que se asume para entrar a la tabla z (P_z), ya que se comprobó que dichas muestras se ajustan a un modelo normal aproximado, y $P(A)$ es la probabilidad de que en un año ocurran heladas.

$P(A)$ se calcula haciendo m/n , siendo m la cantidad de años con heladas y n la cantidad de años de la serie con datos (con y sin heladas). Esta probabilidad en porcentaje es igual al porcentaje de años con heladas hallado para el régimen agroclimático de heladas (%AcH).

Cuando ocurren heladas en la totalidad de los años, ésta probabilidad (m/n) es igual a 1. Entonces la probabilidad total (P_t) de que ocurra helada ese año y que la primera helada ocurra en una fecha o antes (para el caso de

primeras heladas) es igual a la probabilidad elegida para ingresar a la tabla z (Pz).

Por otro lado, cuando la probabilidad de que ocurran heladas en un año (m/n o %AcH) es menor a 1, se puede despejar la probabilidad con la que entrar a la tabla z (Pz) para que la probabilidad total (Pt) de que ocurra helada en un año y que ocurra en determinada fecha o antes (para el caso de primeras heladas), sea la buscada, por ejemplo en este análisis se usaron valores de 0,1, 0,2, 0,33 y 0,5, es decir una vez cada 10 años, una vez cada 5 años, una vez cada 3 años y una vez cada 2 años, respectivamente:

$$Pz = \frac{Pt}{\left(\frac{m}{n}\right)}$$

Tal que:

$$Pz = Pt \cdot \frac{n}{m}$$

Se debe tener en cuenta que la probabilidad total (Pt) debe ser siempre menor o igual a la probabilidad de que ocurran heladas en un año (m/n), ya que es el factor que puede limitar su valor, como se observa en la ecuación $Pz = Pt \cdot n/m$.

Las probabilidades totales con las que se trabajó son siempre menores a 0,5, ya que deben representar un riesgo razonable. También como este trabajo tiene un enfoque forestal, se inspeccionaron probabilidades más bajas de lo que normalmente se usan en la actividades agrícolas, como, 0,1 (o una vez cada 10 años), ya que la forestación presenta ciclos que en general son iguales o mayores a 10 años, sobre todo para el caso de los eucaliptos destinados a producir pulpa de celulosa.

Las fechas calculadas asumiendo una probabilidad de 0,5, en los casos en los que en el 100% de los años ocurren heladas, corresponden a los datos de fechas medias de primeras y últimas heladas hallados y mencionados en el régimen agroclimático de heladas.

3.4.6. Análisis descriptivo del evento junio 2012

Se realizó un breve análisis descriptivo del evento extremo de junio 2012, teniendo en cuenta la fecha de ocurrencia y días que abarcó el evento, la intensidad, entendida como las mínimas temperaturas alcanzadas, tanto en la mínima como en la máxima.

También se comparó la fecha del evento con el dato de fecha media de primera helada, y también se contrastó la mínima temperatura ocurrida en el evento con la temperatura mínima absoluta histórica de cada estación, para tener una idea de que tan extremo fue el evento.

Además se analizó para cada estación, si esa determinada cantidad de días seguidos con heladas, que ocurrieron en el evento extremo 2012, se había repetido anteriormente, en algún momento, explorando en las series utilizadas en el trabajo, que constan de 33 años en su mayoría. Además, se analizó de la misma manera, la cantidad de días seguidos con temperaturas por debajo del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Por último se evaluaron las condiciones meteorológicas previas al evento, para lo cual se graficó la temperatura media y temperatura mínima, desde abril a julio del 2012 y del 2011, de varias estaciones meteorológicas, para comparar esos dos años particulares en cuanto a las heladas. Ya que como se mencionó en la revisión bibliográfica, desde el punto de vista fenológico, las condiciones térmicas previas a un evento de helada determinan el grado de endurecimiento que tiene las plantas al momento de enfrentar el evento; si la tensión térmica es mayor el evento es potencialmente más peligroso. Por ejemplo si previo a la helada existen temperaturas activas (mayores a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) que estimulan la actividad vegetativa, al momento de la helada la planta presenta brotes jóvenes, más sensibles a las heladas que los tejidos más lignificados (Burgos, 1963).

Por otro lado cuando la tensión térmica anual es menor, es decir se da una bajada gradual de las temperaturas, esto permite a las plantas aclimatarse y endurecerse, lo que les permite ser más resistentes a las bajas temperaturas al momento de enfrentarlas (Burgos, 1963).

4. RESULTADOS

Los resultados para las diferentes estaciones meteorológicas se presentan por umbral para que puedan ser comparables, y en algunos casos se usan nombres abreviados de las estaciones meteorológicas, los cuales se indican a continuación entre paréntesis.

Las estaciones meteorológicas se encuentran ordenadas en los cuadros de tal modo que en la parte superior se encuentran las estaciones ubicadas más al sur del país: Carrasco, Sayago, INIA Las Brujas (INIA LB), INIA La Estanzuela (INIA LE) y Rocha; luego más abajo en el cuadro se encuentran las estaciones ubicadas hacia el litoral oeste: Mercedes, Paysandú, Salto e INIA Salto Grande (INIA SG), luego aparece la estación Paso de los Toros (Paso) que se encuentra hacia el centro del país, le siguen las estaciones ubicadas más al noreste: INIA Treinta y Tres (INIA TyT) y Melo; y por último se incluyen la estaciones Rivera y Artigas que son las ubicada más al norte.

4.1. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA TEMPERATURA

En el Cuadro No. 9 se pueden observar los diferentes parámetros medios estimados para realizar la caracterización térmica general: temperatura máxima media (TXM), temperatura mínima media (TNM), temperatura media anual (TM), temperatura máxima media del mes de enero (TXM enero), temperatura mínima media de mes de julio (TNM julio), temperatura mínima anual media (TNAM) y también se incluye el valor de la temperatura mínima absoluta histórica (TNabs.Histo.).

En cuanto a la temperatura media anual (TM) se puede observar que es menor en las estaciones meteorológicas ubicadas más al sur del país, donde presenta valores entre 16,5 y 16,8 °C, y va aumentando hacia el norte, donde alcanza los 19,4 °C, en la estación Artigas.

Si se observa la temperatura mínima media de mes de julio (TNM julio) y la temperatura máxima media del mes de enero (TXM enero), se puede visualizar la amplitud térmica anual que existe en las diferentes estaciones meteorológicas evaluadas, siendo ésta mayor en las estaciones ubicadas más al noroeste, litoral oeste y centro del país, donde se registran las temperaturas más bajas en invierno y las más altas en verano.

En las estaciones meteorológicas Rivera y Artigas, también la amplitud térmica anual es mayor que en las estaciones ubicadas al sur, pero comparado con los valores encontrados hacia el noreste, litoral oeste y centro del país, hay

un leve aumento de la temperatura mínima media del mes de julio, lo que disminuye levemente la amplitud térmica anual.

La amplitud térmica también se puede visualizar teniendo en cuenta la temperatura máxima media (TXM) y la temperatura mínima media (TNM).

Como el presente trabajo está enfocado en caracterizar las heladas en el país también se estimó la temperatura mínima anual media (TNAM) y se extrajo de las series la temperatura mínima absoluta histórica (TNabs.Histo.), para saber en qué estaciones meteorológicas se registraron las mínimas temperaturas históricas. Se puede observar que en las estaciones ubicadas más al sur los valores son los más altos del país.

Cuadro No. 9. Resultados de la caracterización general de la temperatura de cada estación meteorológica: temperatura máxima media (TXM), temperatura mínima media (TNM), temperatura media (TM), temperatura máxima media de enero (TXM enero), temperatura mínima media de julio (TNM julio), temperatura mínima anual media (TNAM) y temperatura mínima absoluta histórica (TNabs.Histo.)

| Estación | TXM (°C) | TNM (°C) | TM (°C) | TXM enero (°C) | TNM julio (°C) | TNAM (°C) | TNabs. Histo. (°C) |
|----------|----------|----------|---------|----------------|----------------|-----------|--------------------|
| Carrasco | 20,9 | 12,2 | 16,5 | 27,4 | 6,2 | -1,2 | -4,5 |
| Sayago | 21,4 | 12,3 | 16,8 | 28,4 | 6,4 | 0,0 | -2,3 |
| INIA LB | 21,9 | 11,3 | 16,6 | 29,2 | 5,5 | -1,7 | -4,2 |
| INIA LE | 21,7 | 11,9 | 16,8 | 29,0 | 6,0 | -0,9 | -3,0 |
| Rocha | 21,6 | 11,4 | 16,5 | 28,1 | 6,1 | -2,0 | -4,0 |
| Mercedes | 23,7 | 11,4 | 17,6 | 31,6 | 4,9 | -4,4 | -8,0 |
| Paysandú | 24,1 | 12,5 | 18,3 | 31,9 | 6,5 | -1,7 | -3,3 |
| Salto | 25,2 | 13,1 | 19,2 | 32,8 | 6,9 | -2,2 | -5,6 |
| INIA SG | 24,5 | 13,0 | 18,7 | 32,0 | 6,7 | -2,8 | -5,8 |
| Paso | 23,2 | 12,5 | 17,8 | 31,2 | 6,2 | -2,0 | -3,5 |
| INIA TyT | 22,8 | 11,0 | 16,9 | 29,5 | 5,3 | -2,8 | -5,5 |
| Melo | 23,6 | 11,7 | 17,7 | 30,3 | 5,9 | -3,3 | -6,4 |
| Rivera | 23,8 | 13,3 | 18,6 | 30,7 | 7,6 | -0,7 | -2,7 |
| Artigas | 25,2 | 13,6 | 19,4 | 32,3 | 7,7 | -2,5 | -4,5 |

4.2. RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS MEDIOS ESTIMADOS DEL RÉGIMEN AGROCLIMÁTICO DE HELADAS

En los Cuadros No. 10, 11, 12, 13 y 14 se presentan, para cada umbral, los resultados de los parámetros medios estimados del régimen agroclimático de heladas que pueden ser de utilidad en la toma de decisiones agronómicas: porcentaje de años con heladas (%AcH), fecha media de ocurrencia de primera helada (FMPH) y su desviación estándar (\pm DE, días), fecha media de ocurrencia de última helada (FMUH) y su desviación estándar (\pm DE, días), período medio con heladas (PMCH, días) y el período medio libre de heladas (PMLH, días).

En los Mapas No. 2, 3, 5, 7 y 9 se observan los valores para cada estación meteorológica, de los parámetros medios estimados del régimen agroclimático de heladas, calculados con el umbral 0 °C: porcentaje de años con heladas, fecha media de primera helada, fecha media de última helada, período medio con heladas y período medio libre de heladas.

En los Mapas No. 4, 6, 8 y 10 se ven trazadas las isolíneas, creadas a partir de una interpolación, para cada una de las siguientes características del régimen agroclimático de heladas: fecha media de primera helada, fecha media de última helada, período medio con heladas y período medio libre de heladas. Estas isolíneas fueron elaboradas por interpolación a partir de los valores georreferenciados que se muestran en los mapas anteriormente mencionados.

Los mapas para cada uno de los parámetros estimados se presentan en un orden, de tal modo que representan el proceso realizado en la tesis, ya que primero aparece un mapa con la ubicación de las estaciones meteorológicas (Mapa No. 1), luego un mapa con los valores que ese parámetro estimado toma en cada estación y le sigue el mapa con isolíneas creado a partir de la interpolación de los puntos del mapa anterior.

Los mapas se agregan en la tesis como una forma alternativa de enseñar los resultados. Se debe aclarar que los mapas con isolíneas se presentan, tan sólo, como una primera aproximación sobre el comportamiento de éstas en el territorio nacional.

De todas formas en los mapas se pueden ver reflejados los resultados que se describen anteriormente. Por ejemplo se observa el gradiente que existe desde el sur del país, donde se presentan las fechas medias de primeras heladas más tardías y las fechas medias de últimas heladas más tempranas, el período medio con heladas más corto y por consiguiente el período medio libre de heladas más largo.

Al mirar las caracterizaciones del umbral -4 y -2 °C (Cuadros No. 10 y 11) lo primero que se debe tener en cuenta es la incidencia de estas temperaturas en las diferentes estaciones meteorológicas. Por ejemplo teniendo en cuenta la caracterización con el umbral -4 °C se puede observar que en muchas estaciones ubicadas al sur del país, temperaturas tan bajas no se registraron en las series; o se registraron una sola vez, como en el caso de las estaciones Carrasco, INIA Las Brujas y Rocha, lo que genera que la fecha media de primera helada y la fecha media de última helada sean iguales y el período medio con heladas (PMCH) es de tan sólo un día.

En cuanto al porcentaje de años con heladas utilizando el umbral -4 y -2 °C se presenta un alto valor en la estación Mercedes. En la estación Rivera se presenta un valor bajo.

En cuanto al porcentaje de años con heladas (%ACh), teniendo en cuenta este umbral (0 °C) (Cuadro No. 12), todas las estaciones meteorológicas ubicadas al sur presentaron valores menores al 100%, siendo el menor valor el registrado en la estación Sayago, de tan sólo 45,5 % de años con heladas. En las estaciones ubicadas hacia el litoral oeste y centro se registra el mayor porcentaje de años con heladas, en muchos casos alcanzando al 100%, siendo los menores valores de este sector del país, de alrededor del 90%, los correspondientes a las estaciones Salto y Paysandú. En cuanto a las estaciones ubicadas más al noreste también se registran estaciones con hasta 100% de años con heladas (INIA Treinta y Tres y Melo). La estación Rivera presenta valores considerablemente menores (63,4%), y en el caso de la estación Artigas no alcanza tampoco al 100% de los años (96,4%).

En cuanto a la fecha media de primera helada (FMPH) los valores correspondientes a las heladas más tempranas fueron los estimados en las estaciones meteorológicas ubicadas hacia el litoral oeste y noreste del país. La estación Mercedes presenta la fecha más temprana, el 30 de mayo y le siguen las estaciones Melo (31 de mayo) e INIA Treinta y Tres (8 de junio). En las estaciones ubicadas al sur se presentan las fechas de primeras heladas más tardías, siempre en la segunda quincena de junio. Hacia el norte, en las estaciones Rivera y Artigas, también se presentan fechas medias de primeras heladas más tardías que en las estaciones que se ubican hacia el litoral oeste, centro y noreste del país.

En cuanto a los valores de fecha media de última helada (FMUH), el valor correspondiente a la fecha media más tardía se ubica en la estación Mercedes (6 de setiembre), que junto con el dato de fecha media de primera helada (FMPH) determina que sea la estación con el período medio con heladas (PMCH) mayor de todo el país, de 100 días.

En general los valores más tardíos de fecha media de última helada se dan en las estaciones meteorológicas ubicadas hacia el litoral oeste y noreste del país. En las estaciones que se encuentran al sur se registran los valores de fechas medias de últimas heladas más tempranos, en la segunda quincena de julio y primera de agosto, excepto en la estación Rocha donde se registra un valor un poco más tardío (27 de agosto).

Analizando a las estaciones meteorológicas según su ubicación, se puede decir que en las ubicadas hacia el litoral oeste (Mercedes) y noreste (INIA Treinta y Tres y Melo), suceden las primeras heladas más tempranas y las últimas heladas más tardías, determinado así las partes del país con mayor período medio con heladas, de entre 80 y 100 días. En cambio más hacia el sur el período con heladas medio es de entre 30 y 50 días aproximadamente; menos en la estación Rocha en la cual es de 70 días.

El período medio libre de heladas (PMLH) presenta el menor valor en la estación Mercedes y en las estaciones ubicadas al noreste (Melo e INIA treinta y Tres).

Se observa que en las estaciones Rivera y Artigas el período medio libre de heladas es mayor, que para las estaciones ubicadas al noreste.

En las estaciones meteorológicas ubicadas al sur se da el mayor período libre de heladas, llegando a un máximo de 337 días en las estaciones Carrasco e INIA La Estanzuela. En la estación Rocha, a pesar de estar ubicada en el Sur, el período libre de heladas medio es de 295 días, siendo el valor más bajo de las estaciones ubicadas al sur. También la estación INIA Las Brujas presenta un valor un poco más bajo que la mayoría de las estaciones del sur.

En términos generales para la mayoría de las estaciones meteorológicas el período con heladas medio (PMCH) abarca el período desde mediados de junio a mediados de agosto. En las estaciones donde este período es mayor, comienza a fines de mayo o principios de junio y termina a fines de agosto o principios de setiembre.

En cuanto a las caracterizaciones realizadas con los umbrales 2 y 4 ° C se puede decir que en términos generales se mantiene la misma tendencia.

Cuadro No. 10. Resultados de los parámetros medios estimados del régimen agroclimático de heladas para cada estación, usando el umbral -4 °C: porcentaje de años con heladas (%AcH), fecha media de primera helada (FMPH) y su desvío estándar (DE), fecha media de última helada (FMUH) y su desvío estándar (DE), período medio con heladas (PMCH) y período medio libre de heladas (MNLH)

| Estación | %AcH | FMPH MEDIA±DE (días) | FMUH MEDIA±DE (días) | PMCH (días) | PMLH (días) |
|----------|------|----------------------------|----------------------------|----------------|----------------|
| Carrasco | 3,1 | 13-jun. | 13-jun. | 1 | 364 |
| Sayago | 0 | | | 0 | 365 |
| INIA LB | 3 | 31-jul. | 31-jul. | 1 | 364 |
| INIA LE | 0 | | | 0 | 365 |
| Rocha | 3 | 29-jul. | 29-jul. | 1 | 364 |
| Mercedes | 63,6 | 05-jul. ± 18,7 | 27-jul. ± 18,8 | 23 | 342 |
| Paysandú | 0 | | | 0 | 365 |
| Salto | 9,1 | 27-jun. ± 17,4 | 17-jul. ± 13,1 | 21 | 344 |
| INIA SG | 18,2 | 13-jul. ± 10,1 | 14-jul. ± 9,8 | 2 | 363 |
| Paso | 0 | | | 0 | 365 |
| INIA TyT | 21,2 | 19-jul. ± 27,3 | 28-jul. ± 21,2 | 10 | 355 |
| Melo | 30,3 | 05-jul. ± 29,5 | 17-jul. ± 25,1 | 13 | 352 |
| Rivera | 0 | | | 0 | 365 |
| Artigas | 17,9 | 08-jul. ± 21,8 | 09-jul. ± 21,7 | 2 | 363 |

Cuadro No. 11. Resultados de los parámetros medios estimados del régimen agroclimático de heladas para cada estación, usando el umbral -2 °C: porcentaje de años con heladas (%AcH), fecha media de primera helada (FMPH) y su desvío estándar (DE), fecha media de última helada (FMUH) y su desvío estándar (DE), período medio con heladas (PMCH) y período medio libre de heladas (MNLH)

| Estación | %AcH | FMPH MEDIA±DE (días) | FMUH MEDIA±DE (días) | PMCH (días) | PMLH (días)) |
|----------|------|----------------------------|----------------------------|----------------|-----------------|
| Carrasco | 25 | 04-jul. ± 23,6 | 22-jul. ± 32,5 | 19 | 346 |
| Sayago | 6,1 | 21-jul. ± 2,8 | 11-ago. ± 31,8 | 22 | 343 |
| INIA LB | 45,5 | 11-jul. ± 20,2 | 26-jul. ± 22,0 | 16 | 349 |
| INIA LE | 18,2 | 13-jul. ± 17,4 | 14-jul. ± 17,4 | 2 | 363 |
| Rocha | 54,6 | 18-jul. ± 25,4 | 09-ago. ± 17,4 | 23 | 342 |
| Mercedes | 90,9 | 10-jun. ± 20,6 | 11-ago. ± 26,7 | 63 | 302 |
| Paysandú | 42,4 | 10-jul. ± 22,5 | 19-jul. ± 21,4 | 10 | 355 |
| Salto | 66,7 | 08-jul. ± 22,7 | 25-jul. ± 19,8 | 18 | 347 |
| INIA SG | 72,7 | 03-jul. ± 16,6 | 20-jul. ± 17,7 | 18 | 347 |
| Paso | 57,9 | 30-jun. ± 13,5 | 15-jul. ± 15,0 | 16 | 349 |
| INIA TyT | 72,7 | 27-jun. ± 23,0 | 25-jul. ± 22,8 | 29 | 336 |
| Melo | 81,8 | 16-jun. ± 18,5 | 26-jul. ± 22,3 | 41 | 324 |
| Rivera | 17,9 | 18-jul. ± 12,5 | 19-jul. ± 12,3 | 2 | 363 |
| Artigas | 67,9 | 26-jun. ± 27,7 | 16-jul. ± 21,4 | 21 | 344 |

Cuadro No. 12. Resultados de los parámetros medios estimados del régimen agroclimático de heladas para cada estación, usando el umbral 0 °C: porcentaje de años con heladas (%AcH), fecha media de primera helada (FMPH) y su desvío estándar (DE), fecha media de última helada (FMUH) y su desvío estándar (DE), período medio con heladas (PMCH) y período medio libre de heladas (MNLH)

| Estación | %AcH | FMPH MEDIA±DE (días) | FMUH MEDIA±DE (días) | PMCH (días) | PMLH (días) |
|----------|------|----------------------------|----------------------------|----------------|----------------|
| Carrasco | 81,3 | 24-jun. ± 16,1 | 28-jul. ± 26,0 | 35 | 330 |
| Sayago | 45,5 | 29-jun. ± 18,1 | 26-jul. ± 25,4 | 28 | 337 |
| INIA LB | 93,9 | 23-jun. ± 20,9 | 14-ago. ± 18,5 | 53 | 312 |
| INIA LE | 78,8 | 28-jun. ± 17,3 | 25-jul. ± 19,6 | 28 | 337 |
| Rocha | 93,9 | 19-jun. ± 17,0 | 27-ago. ± 24,2 | 70 | 295 |
| Mercedes | 100 | 30-may. ± 20,6 | 06-sep. ± 23,6 | 100 | 265 |
| Paysandú | 93,9 | 21-jun. ± 20,7 | 06-ago. ± 22,6 | 47 | 318 |
| Salto | 90,9 | 19-jun. ± 19,3 | 10-ago. ± 23,8 | 53 | 312 |
| INIA SG | 100 | 20-jun. ± 24,4 | 12-ago. ± 30,2 | 54 | 311 |
| Paso | 100 | 14-jun. ± 18,1 | 29-jul. ± 28,2 | 46 | 319 |
| INIA TyT | 100 | 08-jun. ± 26,4 | 28-ago. ± 28,4 | 82 | 283 |
| Melo | 100 | 31-may. ± 20,0 | 18-ago. ± 25,6 | 80 | 285 |
| Rivera | 64,3 | 28-jun. ± 17,9 | 28-jul. ± 20,5 | 31 | 334 |
| Artigas | 96,4 | 10-jun. ± 24,9 | 02-ago. ± 28,3 | 54 | 311 |

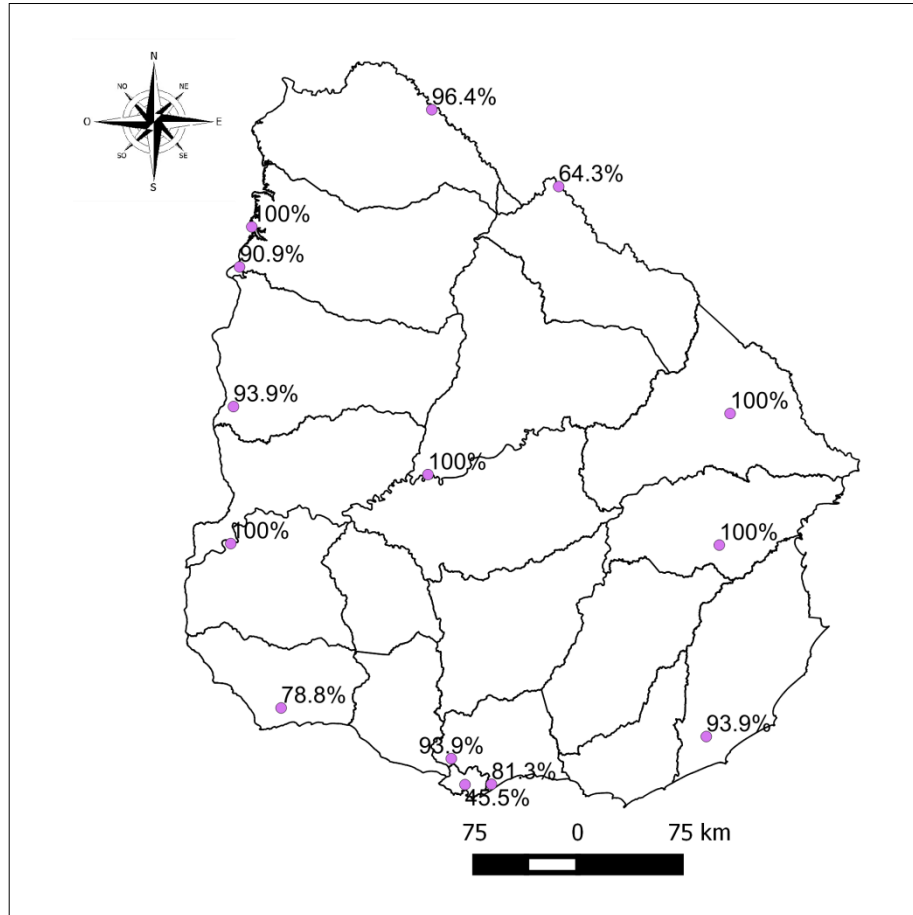
Cuadro No. 13. Resultados de los parámetros medios estimados del régimen agroclimático de heladas para cada estación, usando el umbral 2 °C: porcentaje de años con heladas (%AcH), fecha media de primera helada (FMPH) y su desvío estándar (DE), fecha media de última helada (FMUH) y su desvío estándar (DE), período medio con heladas (PMCH) y período medio libre de heladas (MNLH)

| Estación | %AcH | FMPH MEDIA±DE (días) | FMUH MEDIA±DE (días) | PMCH (días) | PMLH (días) |
|----------|------|----------------------------|----------------------------|----------------|----------------|
| Carrasco | 100 | 07-jun. ± 14,8 | 01-sep. ± 19,4 | 87 | 278 |
| Sayago | 97 | 13-jun. ± 20,4 | 18-ago. ± 29,8 | 67 | 298 |
| INIA LB | 100 | 31-may. ± 15,0 | 12-sep. ± 17,0 | 105 | 260 |
| INIA LE | 100 | 08-jun. ± 23,1 | 26-ago. ± 26,2 | 80 | 285 |
| Rocha | 100 | 29-may. ± 12,9 | 27-sep. ± 20,7 | 122 | 243 |
| Mercedes | 100 | 11-may. ± 16,3 | 27-sep. ± 19,9 | 140 | 225 |
| Paysandú | 100 | 02-jun. ± 16,9 | 09-sep. ± 21,7 | 100 | 265 |
| Salto | 100 | 30-may. ± 18,8 | 02-sep. ± 20,1 | 96 | 269 |
| INIA SG | 100 | 25-may. ± 21,4 | 12-sep. ± 19,6 | 111 | 254 |
| Paso | 100 | 31-may. ± 15,0 | 25-ago. ± 20,6 | 87 | 278 |
| INIA TyT | 100 | 17-may. ± 17,7 | 29-sep. ± 25,4 | 136 | 229 |
| Melo | 100 | 15-may. ± 16,3 | 24-sep. ± 17,7 | 133 | 232 |
| Rivera | 96,4 | 08-jun. ± 15,6 | 27-ago. ± 19,5 | 81 | 284 |
| Artigas | 100 | 28-may. ± 18,7 | 28-ago. ± 22,6 | 93 | 272 |

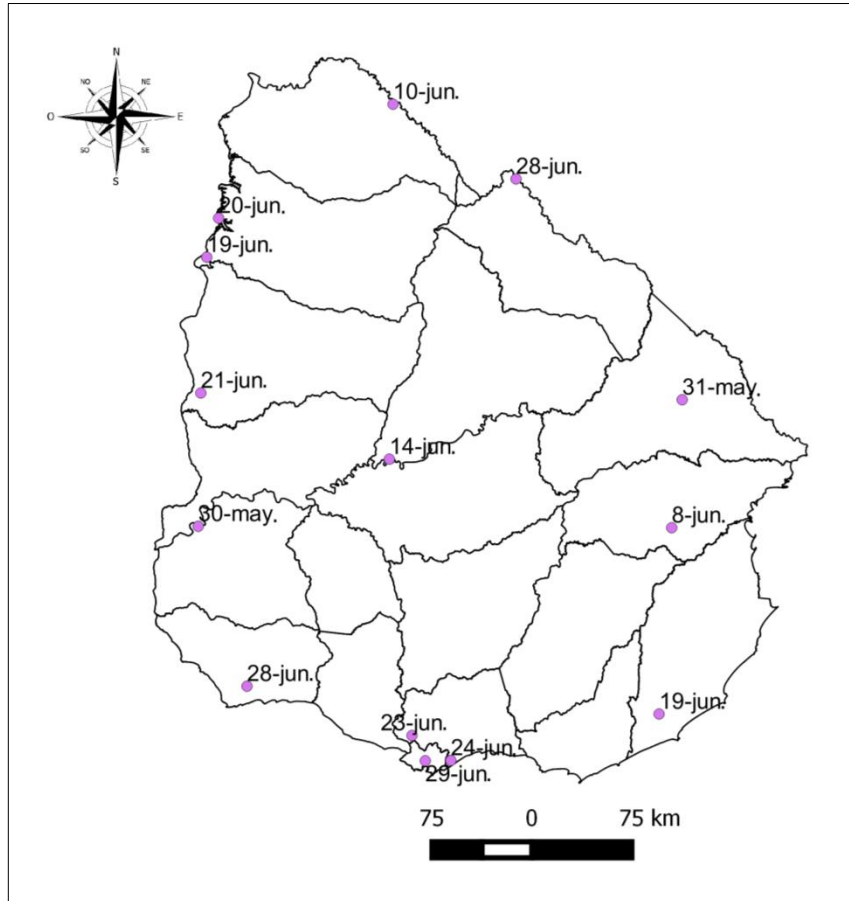
Cuadro No. 14. Resultados de los parámetros medios estimados del régimen agroclimático de heladas para cada estación, usando el umbral 4 °C: porcentaje de años con heladas (%AcH), fecha media de primera helada (FMPH) y su desvío estándar (DE), fecha media de última helada (FMUH) y su desvío estándar (DE), período medio con heladas (PMCH) y período medio libre de heladas (MNLH)

| Estación | %AcH | FMPH MEDIA±DE (días) | FMUH MEDIA±DE (días) | PMCH (días) | PMLH (días) |
|----------|------|----------------------------|----------------------------|----------------|----------------|
| Carrasco | 100 | 14-may. ± 15,5 | 27-sep. ± 17,2 | 137 | 228 |
| Sayago | 100 | 31-may. ± 17,2 | 17-sep. ± 21,8 | 110 | 255 |
| INIA LB | 100 | 15-may. ± 15,8 | 05-oct. ± 19,8 | 144 | 221 |
| INIA LE | 100 | 20-may. ± 19,5 | 26-sep. ± 16,7 | 130 | 235 |
| Rocha | 100 | 10-may. ± 14,6 | 27-oct. ± 24,1 | 171 | 194 |
| Mercedes | 100 | 22-abr. ± 12,1 | 14-oct. ± 17,1 | 176 | 189 |
| Paysandú | 100 | 14-may. ± 15,9 | 29-sep. ± 16,8 | 139 | 226 |
| Salto | 100 | 12-may. ± 17,2 | 22-sep. ± 16,6 | 134 | 231 |
| INIA SG | 100 | 13-may. ± 17,5 | 30-sep. ± 18,4 | 141 | 224 |
| Paso | 100 | 16-may. ± 12,1 | 30-sep. ± 17,4 | 138 | 227 |
| INIA TyT | 100 | 29-abr. ± 17,0 | 26-oct. ± 18,9 | 181 | 184 |
| Melo | 100 | 22-abr. ± 13,1 | 13-oct. ± 18,2 | 175 | 190 |
| Rivera | 100 | 25-may. ± 15,5 | 18-sep. ± 20,3 | 117 | 248 |
| Artigas | 100 | 09-may. ± 18,3 | 02-oct. ± 17,6 | 147 | 218 |

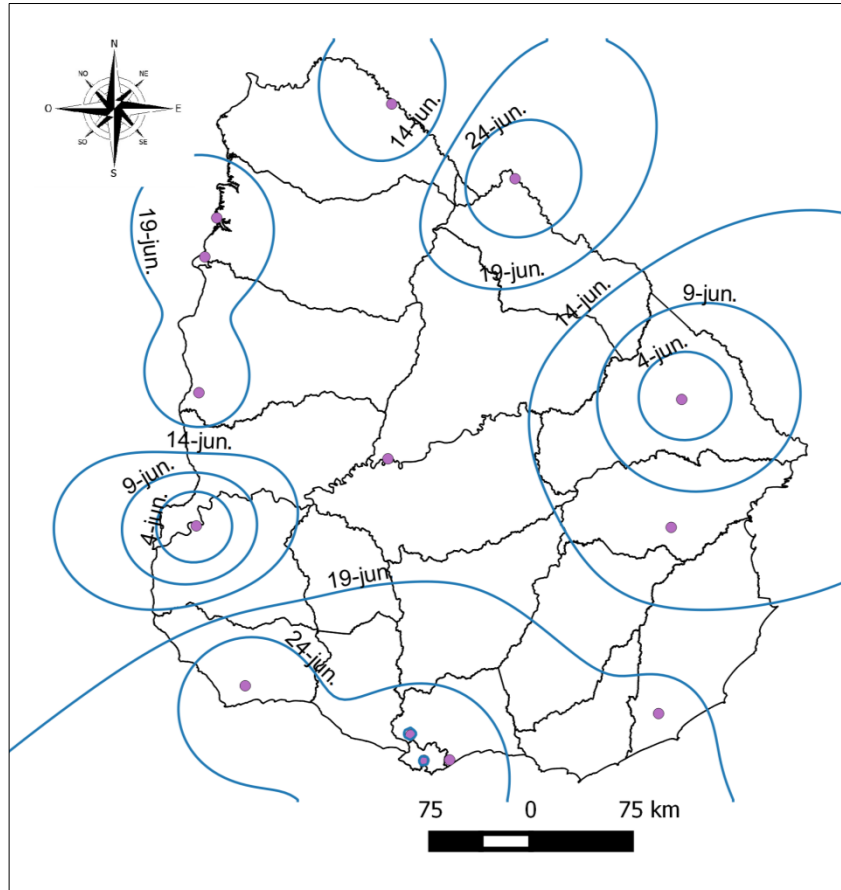
Mapa No. 2. Porcentaje (%) de años con heladas en cada estación meteorológica, usando el umbral 0°C



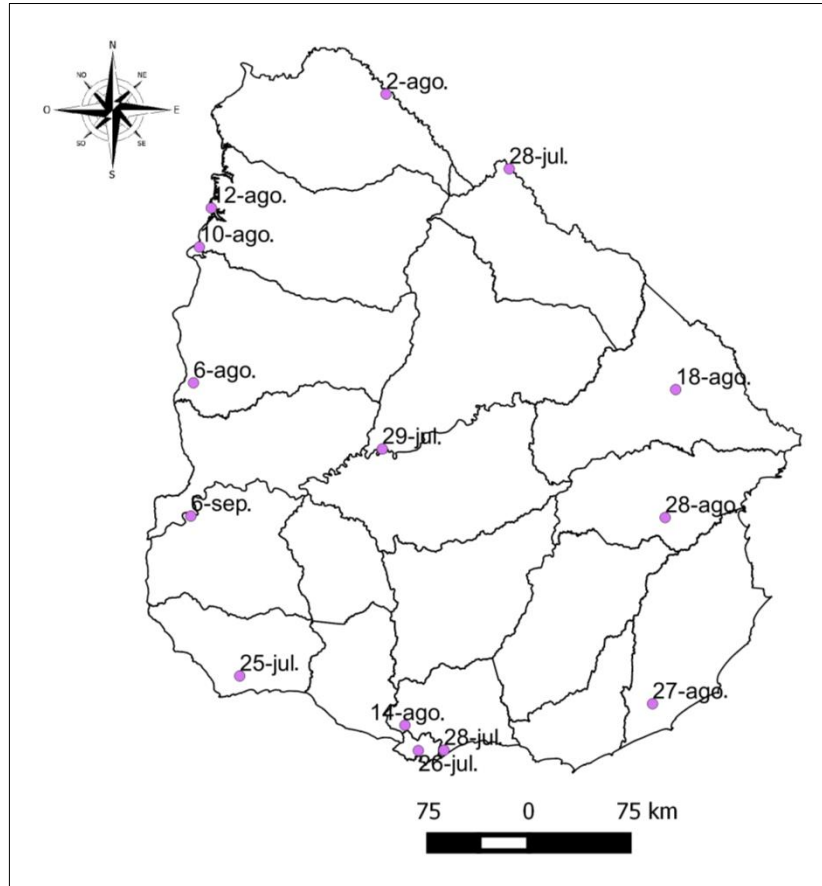
Mapa No. 3. Fecha media de ocurrencia de primera helada en cada estación meteorológica, usando el umbral 0 °C



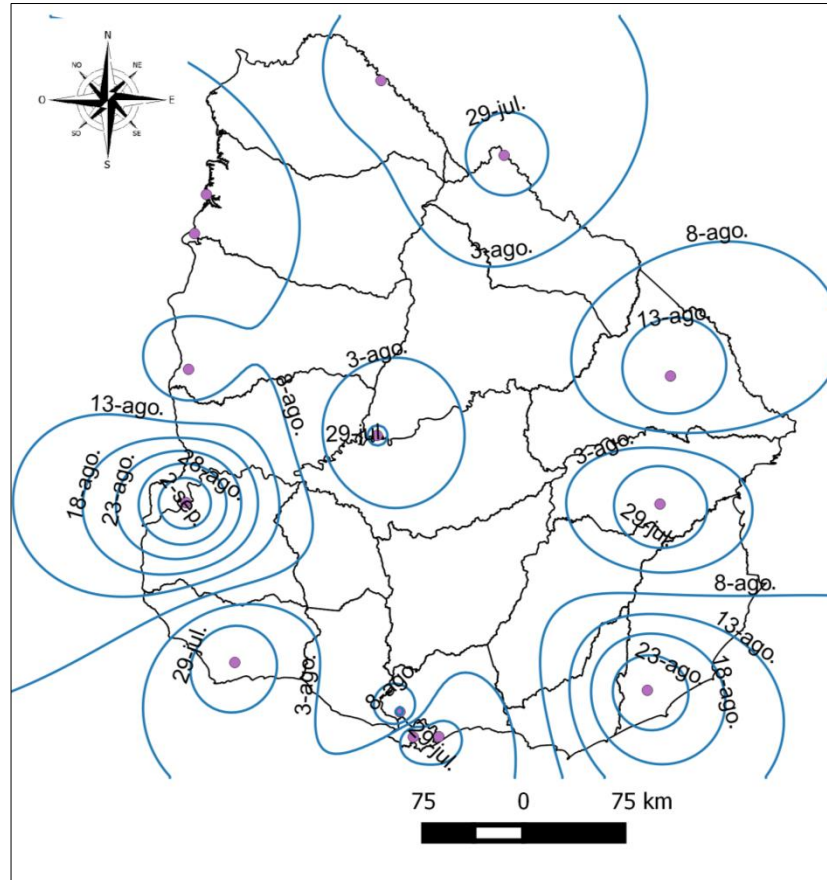
Mapa No. 4. Isolíneas de fecha media de ocurrencia de primera helada, usando el umbral 0 °C



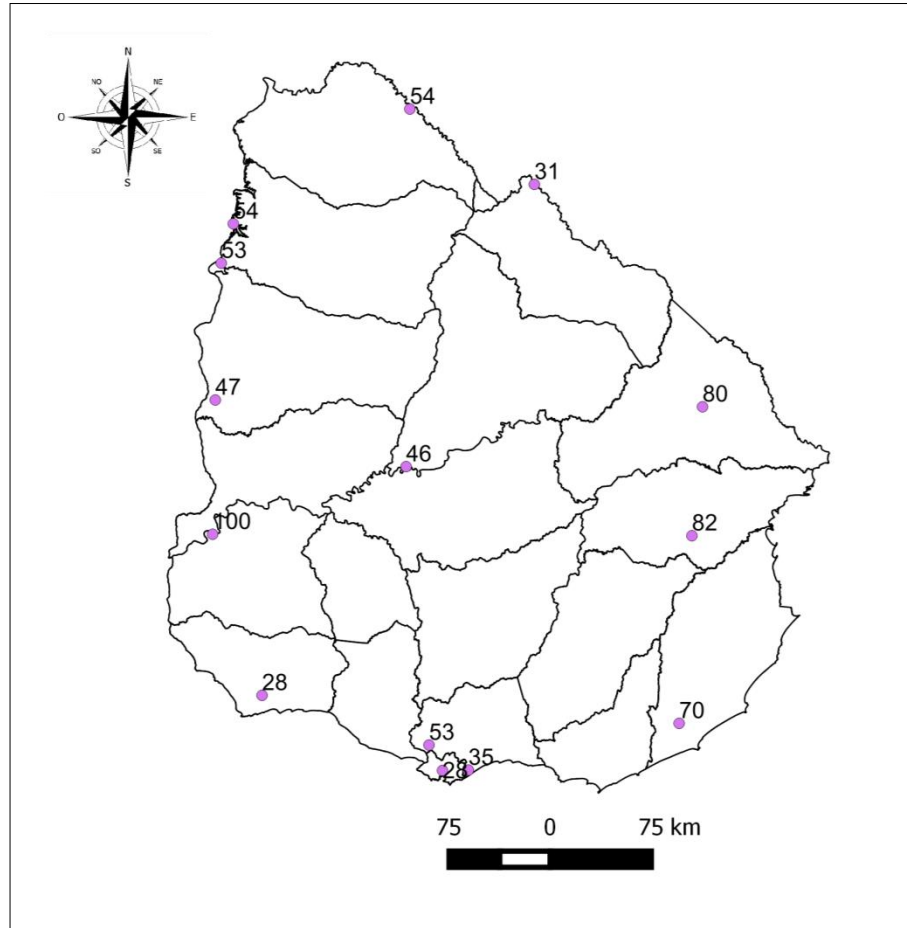
Mapa No. 5. Fecha media de ocurrencia de última helada en cada estación, usando el umbral 0 °C



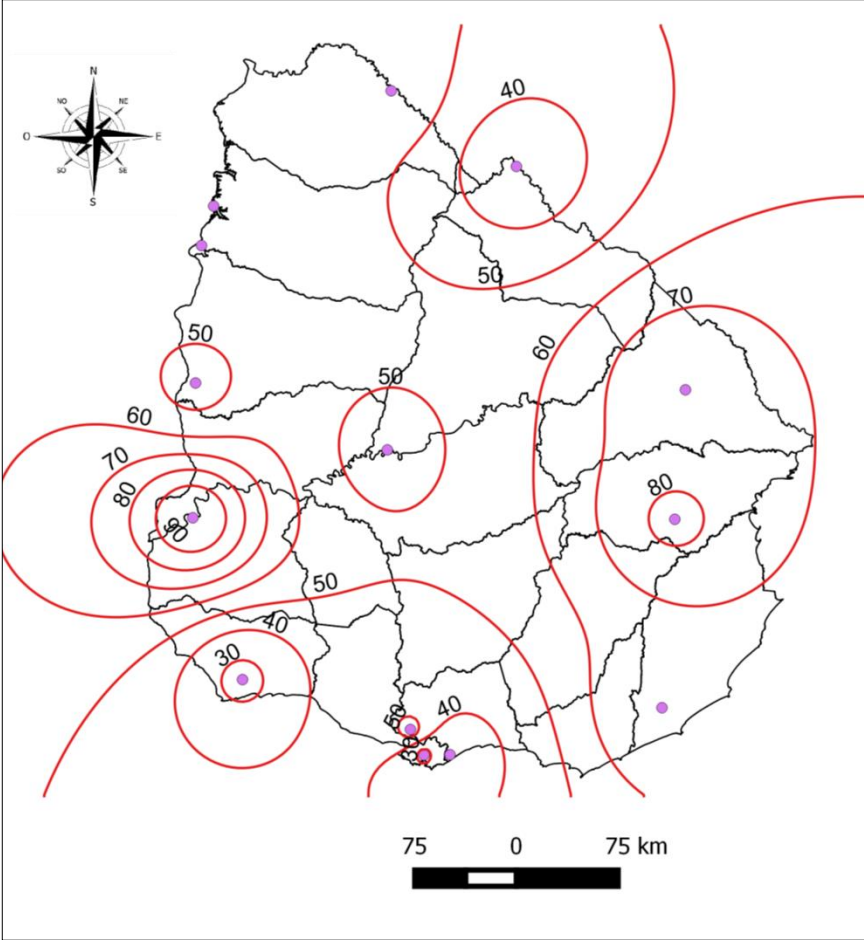
Mapa No. 6. Isolíneas de fecha media de ocurrencia de última helada, usando el umbral 0 °C



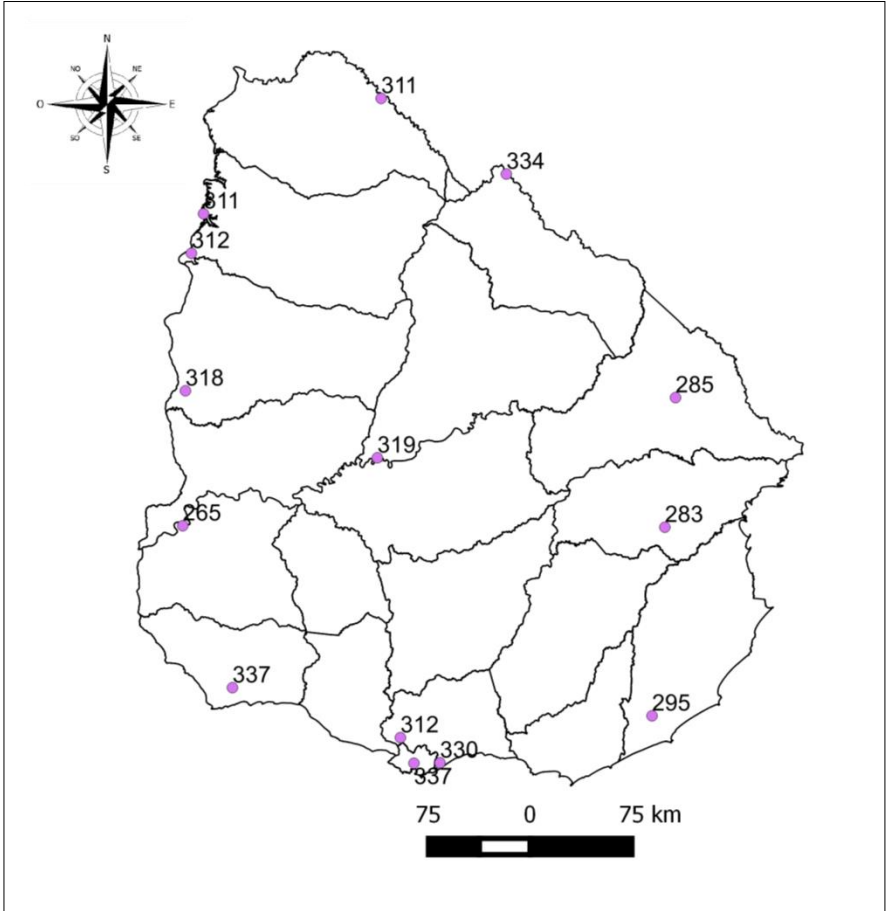
Mapa No. 7. Período medio con heladas de cada estación meteorológica, usando el umbral 0 °C



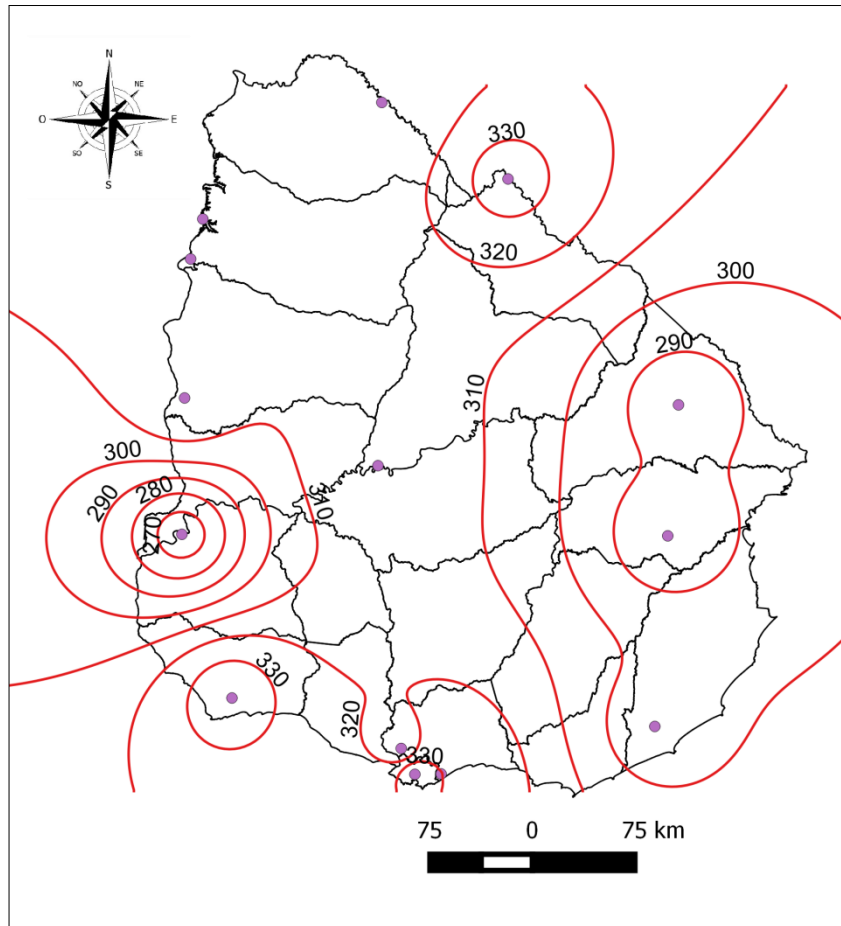
Mapa No. 8. Isolíneas del período medio con heladas, usando el umbral 0 °C



Mapa No. 9. Período medio libre de heladas de cada estación meteorológica, usando el umbral 0 °C



Mapa No. 10. Isolíneas del período medio libre de heladas, usando el umbral 0 °C



4.3. RESULTADOS DE LOS VALORES EXTREMOS DEL RÉGIMEN AGROCLIMÁTICO DE HELADAS

La caracterización de los valores extremos de interés del régimen de heladas se hizo de forma de complementar el trabajo y de hacerlo más detallado. En los Cuadros No. 15, 16, 17, 18 y 19 se presentan para los diferentes umbrales, las fechas extremas de ocurrencia de primera y última helada (FEPH y FEUH) y el período extremo con y libre de heladas (PECH y PELH).

Considerando la caracterización realizada con el umbral 0 °C, se puede observar que la mayoría de las fechas extremas de ocurrencia de primeras heladas se ubican en los meses de abril y mayo; y la mayoría de las fechas

extremas de ocurrencia de últimas heladas se ubican en los meses de setiembre y octubre.

En las estaciones Carrasco y Sayago, ubicadas hacia el sur del país, se dan los valores menos extremos de fecha de ocurrencia de primeras y últimas heladas.

En cuanto a las caracterizaciones realizadas con los umbrales -4, -2, 2 y 4 ° C se puede decir que en términos generales se mantiene la misma tendencia.

Cuadro No. 15. Resultados de fechas extremas de ocurrencia de primera y última helada y de los períodos extremos con y libre de heladas para cada estación meteorológica, usando el umbral - 4 °C: fecha extrema de primera helada (FEPH), fecha extrema de última helada (FEUH), período extremos con heladas (PECH) y período extremo libre de heladas (PELH)

| Estación | FEPH | FEUH | PECH (días) | PELH (días) |
|----------|---------|---------|-------------|-------------|
| Carrasco | 13-jun. | 13-jun. | 1 | 364 |
| Sayago | | | 0 | 365 |
| INIA LB | 31-jul. | 31-jul. | 1 | 364 |
| INIA LE | | | 0 | 365 |
| Rocha | 29-jul. | 29-jul. | 1 | 364 |
| Mercedes | 31-may. | 06-sep. | 99 | 266 |
| Paysandú | | | 0 | 365 |
| Salto | 07-jun. | 30-jul. | 54 | 311 |
| INIA SG | 29-jun. | 25-jul. | 27 | 338 |
| Paso | | | 0 | 365 |
| INIA TyT | 09-jun. | 03-sep. | 86 | 279 |
| Melo | 01-jun. | 02-sep. | 93 | 272 |
| Rivera | | | 0 | 365 |
| Artigas | 08-jun. | 02-ago. | 55 | 310 |

Cuadro No. 16. Resultados de fechas extremas de ocurrencia de primera y última helada y de los períodos extremos con y libre de heladas para cada estación meteorológica, usando el umbral - 2 °C: fecha extrema de primera helada (FEPH), fecha extrema de última helada (FEUH), período extremos con heladas (PECH) y período extremo libre de heladas (PELH)

| Estación | FEPH | FEUH | PECH (días) | PELH (días) |
|----------|---------|---------|----------------|----------------|
| Carrasco | 13-jun. | 02-sep. | 82 | 283 |
| Sayago | 19-jul. | 02-sep. | 46 | 319 |
| INIA LB | 09-jun. | 03-sep. | 86 | 279 |
| INIA LE | 16-jun. | 04-ago. | 50 | 315 |
| Rocha | 09-jun. | 06-sep. | 90 | 275 |
| Mercedes | 07-may. | 04-oct. | 151 | 214 |
| Paysandú | 07-jun. | 26-ago. | 80 | 285 |
| Salto | 30-may. | 27-ago. | 90 | 275 |
| INIA SG | 01-jun. | 09-ago. | 70 | 295 |
| Paso | 07-jun. | 04-ago. | 58 | 307 |
| INIA TyT | 27-may. | 04-sep. | 102 | 263 |
| Melo | 14-may. | 10-sep. | 121 | 244 |
| Rivera | 30-jun. | 02-ago. | 33 | 332 |
| Artigas | 03-abr. | 26-ago. | 147 | 218 |

Cuadro No. 17. Resultados de fechas extremas de ocurrencia de primera y última helada y de los períodos extremos con y libre de heladas para cada estación meteorológica, usando el umbral 0 °C: fecha extrema de primera helada (FEPH), fecha extrema de última helada (FEUH), período extremos con heladas (PECH) y período extremo libre de heladas (PELH)

| Estación | FEPH | FEUH | PECH (días) | PELH (días) |
|----------|---------|---------|----------------|----------------|
| Carrasco | 29-may. | 23-jul. | 114 | 251 |
| Sayago | 09-jun. | 18-sep. | 102 | 263 |
| INIA LB | 23-may. | 17-sep. | 118 | 247 |
| INIA LE | 15-may. | 02-sep. | 110 | 255 |
| Rocha | 24-may. | 05-oct. | 134 | 231 |
| Mercedes | 15-abr. | 07-oct. | 175 | 190 |
| Paysandú | 13-may. | 04-oct. | 144 | 221 |
| Salto | 16-may. | 04-oct. | 142 | 223 |
| INIA SG | 14-may. | 04-oct. | 144 | 221 |
| Paso | 14-may. | 02-sep. | 113 | 252 |
| INIA TyT | 02-may. | 16-oct. | 169 | 196 |
| Melo | 15-abr. | 04-oct. | 172 | 193 |
| Rivera | 30-may. | 02-sep. | 95 | 270 |
| Artigas | 03-abr. | 09-sep. | 161 | 204 |

Cuadro No. 18. Resultados de fechas extremas de ocurrencia de primera y última helada y de los períodos extremos con y libre de heladas para cada estación meteorológica, usando el umbral 2 °C: fecha extrema de primera helada (FEPH), fecha extrema de última helada (FEUH), período extremos con heladas (PECH) y período extremo libre de heladas (PELH)

| Estación | FEPH | FEUH | PECH (días) | PELH (días) |
|----------|---------|---------|----------------|----------------|
| Carrasco | 14-may. | 15-sep. | 152 | 213 |
| Sayago | 25-abr. | 21-nov. | 211 | 154 |
| INIA LB | 09-may. | 15-oct. | 160 | 205 |
| INIA LE | 17-mar. | 11-oct. | 209 | 156 |
| Rocha | 02-may. | 08-nov. | 191 | 174 |
| Mercedes | 07-abr. | 15-nov. | 223 | 142 |
| Paysandú | 15-abr. | 17-oct. | 185 | 180 |
| Salto | 15-abr. | 04-oct. | 172 | 193 |
| INIA SG | 19-mar. | 05-nov. | 233 | 132 |
| Paso | 05-may. | 26-sep. | 145 | 220 |
| INIA TyT | 08-abr. | 05-dic. | 242 | 123 |
| Melo | 09-abr. | 05-nov. | 211 | 154 |
| Rivera | 13-may. | 04-oct. | 144 | 221 |
| Artigas | 03-abr. | 03-oct. | 184 | 181 |

Cuadro No. 19. Resultados de fechas extremas de ocurrencia de primera y última helada y de los períodos extremos con y libre de heladas para cada estación meteorológica, usando el umbral 4 °C: fecha extrema de primera helada (FEPH), fecha extrema de última helada (FEUH), período extremos con heladas (PECH) y período extremo libre de heladas (PELH)

| Estación | FEPH | FEUH | PECH (días) | PELH (días) |
|----------|---------|---------|-------------|-------------|
| Carrasco | 19-abr. | 10-nov. | 206 | 159 |
| Sayago | 25-abr. | 21-nov. | 211 | 154 |
| INIA LB | 13-abr. | 10-nov. | 212 | 153 |
| INIA LE | 17-mar. | 10-nov. | 239 | 126 |
| Rocha | 16-abr. | 12-dic. | 240 | 125 |
| Mercedes | 29-mar. | 15-nov. | 231 | 134 |
| Paysandú | 14-abr. | 16-nov. | 216 | 149 |
| Salto | 09-abr. | 05-nov. | 211 | 154 |
| INIA SG | 19-mar. | 10-nov. | 237 | 128 |
| Paso | 24-abr. | 05-nov. | 196 | 169 |
| INIA TyT | 05-abr. | 08-dic. | 248 | 117 |
| Melo | 02-abr. | 18-nov. | 232 | 133 |
| Rivera | 16-abr. | 29-oct. | 197 | 168 |
| Artigas | 03-abr. | 15-nov. | 227 | 138 |

4.4. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA PELIGROSIDAD DE LAS HELADAS OTOÑALES Y PRIMAVERALES

Por índice crikindinoscópico de las primeras heladas o de otoño (ICK P) se considera la temperatura media del aire en la fecha hasta la cual ocurren heladas con un 20% de probabilidad. Análogamente, el ICK de últimas heladas o de primavera (ICK U) se considera a la temperatura media del aire en la fecha a partir de la cual ocurren heladas con un 20% de probabilidad (Burgos, 1963).

Entonces para calcular los ICK de otoño y primavera, antes se debió calcular la fecha de ocurrencia hasta (para la primera) y después (para la última) de la cual ocurren heladas con un 20 % de probabilidad; en este caso se utilizó el método empírico o de frecuencias acumuladas.

En el Cuadro No. 20 se observan las fechas hasta las que ocurren heladas con una 20% de probabilidad (Fecha primera 20%), y fecha a partir de

la cual ocurren heladas con un 20% de probabilidad (Fecha última 20%), calculado por el método empírico, para cada estación meteorológica; dichos valores fueron estimados para la determinación del ICK, pero pueden ser, por sí mismos, información útil para la toma de decisiones en la actividad agropecuaria.

Observando el Cuadro No. 20 se puede decir, por ejemplo que en la estación INIA Treinta y Tres la fecha hasta la cual ocurren heladas con un 20% de probabilidad, o sea una vez cada 5 años, es el 20 de mayo. Y la fecha a partir de la cual existe un 20% de probabilidad de ocurrencia de heladas es el 21 de setiembre.

En el Cuadro No. 21 se observan los resultados de los cálculos realizados para caracterizar la peligrosidad de las heladas otoñales y primaverales: ICK de primeras heladas (ICK P), ICK de últimas heladas (ICK U), fecha media de ocurrencia de primeras temperatura de 10 °C o menores (FMP10), fecha media de ocurrencia de últimas temperaturas de 10 °C o menores (FMU10), período de peligrosidad medio de primeras heladas (Ppeli.P, días) y el período de peligrosidad medio de últimas heladas (Ppeli.U, días).

Observando los resultados de los ICK de otoño y primavera, para las diferentes estaciones meteorológicas, se puede observar que las estaciones meteorológicas ubicadas hacia el sur del país presentan valores de ICK de primeras (ICK P) y últimas heladas (ICK U) menores, sobre todo los correspondientes a estaciones próximas al mar como Carrasco, Sayago e INIA La Estanzuela.

Por otro lado, los mayores valores de ICK de otoño y primavera se encuentran en las estaciones ubicadas hacia el litoral oeste, centro, noreste y norte del país.

Analizando exclusivamente las estaciones meteorológicas con mayores valores de ICK, el mayor valor de ICK de otoño o de primeras heladas se registró en la estación Artigas, siendo 16 °C, y el mayor valor de ICK de primavera o de últimas heladas se registró en la estación INIA Salto Grande, siendo de 16,3 °C.

El período de peligrosidad puede interpretarse como un período en el que es persistente la ocurrencia de heladas tempranas o tardías, esto está relacionado con el concepto de que cuando la temperatura mínima es menor o igual a 10° C es más probable que la temperatura descienda hasta llegar a un umbral de helada (0° C).

Cuadro No. 20. Fecha hasta la que ocurren heladas con una 20% de probabilidad, y fecha a partir de la cual ocurren heladas con un 20% de probabilidad, calculado por el método empírico, para cada estación meteorológica

| Estación | Fecha primera 20% | Fecha última 20% |
|----------|-------------------|------------------|
| Carrasco | 10-jun. | 10-ago. |
| Sayago | 20-jun. | 24-jul. |
| INIA LB | 04-jun. | 30-ago. |
| INIA LE | 15-jun. | 08-ago. |
| Rocha | 03-jun. | 16-sep. |
| Mercedes | 12-may. | 25-sep. |
| Paysandú | 31-may. | 23-ago. |
| Salto | 02-jun. | 27-ago. |
| INIA SG | 31-may. | 06-sep. |
| Paso | 28-may. | 25-ago. |
| INIA TyT | 20-may. | 21-sep. |
| Melo | 16-may. | 10-sep. |
| Rivera | 12-may. | 05-ago. |
| Artigas | 22-may. | 29-ago. |

Cuadro No. 21. Resultados de los parámetros estimados para caracterizar la peligrosidad de las heladas otoñales y primaverales en cada estación meteorológica: índice crikindinoscópico de primera heladas (ICK P), índice crikindinoscópico de últimas heladas (ICK U), fecha media de primeras temp. de 10 °C o menores (FMP10), fecha media de últimas temp. de 10 °C o menores (FMU10), período de peligrosidad de primeras heladas (Ppeli.P) y período de peligrosidad de últimas heladas (Ppeli.U)

| Estación | ICK P (°C) | ICK U (°C) | FMP10 | FMU10 | Ppeli.P (días) | Ppeli.U (días) |
|----------|------------|------------|---------|---------|----------------|----------------|
| Carrasco | 11,2 | 13,0 | 06-mar. | 11-dic. | 111 | 137 |
| Sayago | 11,4 | 9,4 | 24-mar. | 01-dic. | 98 | 129 |
| INIA LB | 11,5 | 12,4 | 15-feb. | 12-dic. | 129 | 121 |
| INIA LE | 11,1 | 10,3 | 13-mar. | 04-dic. | 108 | 133 |
| Rocha | 12,5 | 12,6 | 19-ene. | 20-dic. | 152 | 116 |
| Mercedes | 15,4 | 14,2 | 06-feb. | 07-dic. | 114 | 93 |
| Paysandú | 12,3 | 14,4 | 06-mar. | 26-nov. | 107 | 113 |
| Salto | 13,8 | 14,9 | 21-mar. | 22-nov. | 91 | 105 |
| INIA SG | 12,9 | 16,3 | 12-mar. | 23-nov. | 101 | 104 |
| Paso | 13,4 | 14,6 | 24-mar. | 16-nov. | 83 | 111 |
| INIA TyT | 13,7 | 14,3 | 27-ene. | 15-dic. | 133 | 110 |
| Melo | 14,0 | 14,6 | 25-ene. | 14-dic. | 127 | 119 |
| Rivera | 13,2 | 14,5 | 21-mar. | 18-nov. | 100 | 114 |
| Artigas | 16,0 | 15,9 | 15-mar. | 18-nov. | 88 | 109 |

4.5. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE NORMALIDAD

Los resultados de las pruebas para evaluar el ajuste al modelo de distribución normal de las muestras de fechas de ocurrencia de primeras y últimas heladas, por separado, de todas las estaciones meteorológicas, obtenidos a partir de la realización de la prueba Shapiro-Wilk, se presentan en cuadros para cada estación y cada uno de los umbrales (-4, -2, 0, 2 y 4 °C), junto con el valor de probabilidad (p.valor) obtenido, la media (\bar{x}), el desvío estándar muestral (s), y la cantidad de datos de la muestra (m).

Como ya se mencionó anteriormente el criterio de la prueba Shapiro-Wilk para rechazar la hipótesis nula (H_0 : que la muestra proviene de una

población normalmente distribuida) es si el p.valor es menor o igual a 0,05, igualmente en los cuadros aparece una columna que especifica si la muestra se ajusta o no al modelo normal (Normal).

Además para cada muestra de datos se realizó el histograma de densidad con la respectiva curva normal teórica; esto sólo se hizo en muestras que fueron evaluadas, es decir las que tienen al menos 3 datos, como por ejemplo el que aparece en la Gráfica No. 1, realizado con la muestra de fechas de ocurrencia de primeras heladas de la estación Artigas, asumiendo un umbral de $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Todos los histogramas para muestras de fechas de ocurrencia de primeras heladas se encuentran en Anexo No. 3 y para las muestras de fechas de ocurrencia de últimas heladas en Anexo No. 4.

Aclaración de las gráficas: la “Densidad” corresponde a la frecuencia relativa, y los “Días al primer evento” corresponde al número de días a la fecha de ocurrencia de primera o última helada asumiendo el umbral mencionado, siendo el primero de enero el día 1. La curva normal teórica se crea a partir de los datos de media y desvío estándar de la muestra.

No se pudo realizar la prueba de normalidad en algunas muestras, porque la cantidad de datos de éstas era menor a 3, en estos casos aparecen las celdas vacías en el cuadro de resultados. Tal es el caso de algunas muestras correspondientes al umbral -4 y $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, esto se debe a que en la estación no se presentaron suficientes años con temperaturas tan bajas, igual o menores a -4 o $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Los casos en los que no se pudo realizar la prueba de normalidad en las muestras de fechas de ocurrencia de primeras y últimas heladas del umbral $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, fueron las correspondientes a las estaciones: Carrasco, Paso de los Toros, Paysandú, Rivera, Rocha, Sayago, INIA Las Brujas e INIA La Estanzuela.

El único caso en que no se pudo realizar la prueba de normalidad en las muestras de fechas de ocurrencia de primeras y últimas heladas del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ fue para la estación Sayago.

Para una gran mayoría de pruebas de fechas de ocurrencia de primeras heladas, el resultado del ajuste al modelo normal, teniendo en cuenta el umbral $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, fue positivo, por ejemplo para el caso de la estación Artigas, como se puede observar en el Cuadro No. 22. En la Gráfica No. 2 se puede observar el histograma de densidad y la curva normal teórica, trazada con los parámetros estimados de media y desvío estándar de dicha muestra.

Hubo 3 casos de muestras de fechas de ocurrencia de primeras heladas para el umbral $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, en los que se rechazó la hipótesis nula, debido a

que el p.valor era menor a 0,05, por lo tanto se puede decir que dichas muestras no provienen de una población con distribución normal; las muestras fueron las correspondientes a las estaciones: Rocha, INIA Treinta y Tres e INIA Salto Grande. Como se puede observar en las Gráficas No. 3, 4 y 5, los histogramas de las mencionadas muestras presentan una distribución que poco se asemeja a la campana de Gauss, que tiene la característica de presentar simetría en torno a la media.

Teniendo en cuenta los otros umbrales, en cuanto a las muestras de fechas de ocurrencia de primeras heladas la gran mayoría se ajusta al modelo normal. Los casos en que no se ajustó fueron, para el umbral -2 °C, la muestra correspondiente a la estación Artigas, y para los umbrales 2 y 4 °C las correspondientes a la estación INIA La Estanzuela.

Con respecto a las muestras de fechas de ocurrencia de últimas heladas del umbral 0 °C para una gran mayoría el ajuste fue positivo excepto para el caso correspondiente a la estación Mercedes, como se puede observar el Cuadro No. 39.

Teniendo en cuenta los otros umbrales, en cuanto a las muestras de fechas de últimas heladas, también la gran mayoría se ajusta al modelo normal; los casos en los que no se ajustó fueron, para el umbral -2 °C, las correspondientes a las estaciones Mercedes e INIA Salto Grande, y para el umbral 4 °C la correspondiente a la estación INIA La Estanzuela.

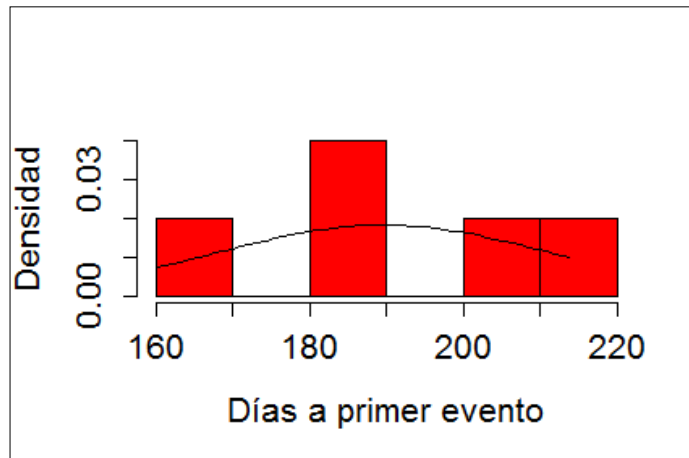
Con estos resultados se puede calcular probabilidades de ocurrencia de heladas asumiendo una distribución normal en gran parte del país, aunque no en la totalidad.

4.5.1. Resultados de las pruebas de normalidad para primeras heladas

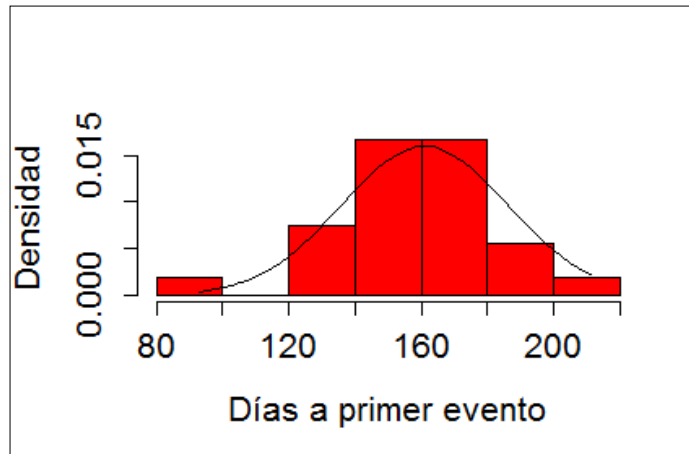
Cuadro No. 22. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Artigas

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 5 | 0,6038 | si | 189,6 | 21,8 |
| -2 | 19 | 0,03191 | no | 177,6 | 27,7 |
| 0 | 27 | 0,7378 | si | 161,0 | 24,9 |
| 2 | 28 | 0,1517 | si | 148,7 | 18,7 |
| 4 | 28 | 0,9741 | si | 129,2 | 18,3 |

Gráfica No. 1. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Artigas



Gráfica No. 2. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Artigas



Cuadro No. 23. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Carrasco

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 1 | | | | |
| -2 | 8 | 0,0949 | si | 185,9 | 23,6 |
| 0 | 26 | 0,3493 | si | 175,0 | 16,1 |
| 2 | 32 | 0,1225 | si | 158,8 | 14,8 |
| 4 | 32 | 0,5625 | si | 134,9 | 15,3 |

Cuadro No. 24. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Melo

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 10 | 0,288 | si | 186,2 | 29,5 |
| -2 | 27 | 0,6012 | si | 168,0 | 18,5 |
| 0 | 33 | 0,516 | si | 151,8 | 20,0 |
| 2 | 33 | 0,9303 | si | 135,9 | 16,3 |
| 4 | 33 | 0,08689 | si | 112,7 | 13,1 |

Cuadro No. 25. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Mercedes

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 21 | 0,9365 | si | 186,3 | 18,7 |
| -2 | 30 | 0,3014 | si | 161,4 | 20,6 |
| 0 | 33 | 0,4956 | si | 150,4 | 20,6 |
| 2 | 33 | 0,9742 | si | 131,5 | 16,3 |
| 4 | 33 | 0,4262 | si | 112,2 | 12,1 |

Cuadro No. 26. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Paso de los Toros

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 0 | | | | |
| -2 | 11 | 0,1188 | si | 181,0 | 13,5 |
| 0 | 19 | 0,5932 | si | 165,5 | 18,1 |
| 2 | 19 | 0,4974 | si | 151,6 | 15,0 |
| 4 | 19 | 0,7685 | si | 136,3 | 12,1 |

Cuadro No. 27. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Paysandú

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 0 | | | | |
| -2 | 14 | 0,5878 | si | 191,1 | 22,5 |
| 0 | 31 | 0,1923 | si | 172,3 | 20,7 |
| 2 | 33 | 0,7617 | si | 153,2 | 16,9 |
| 4 | 33 | 0,8213 | si | 134,9 | 15,9 |

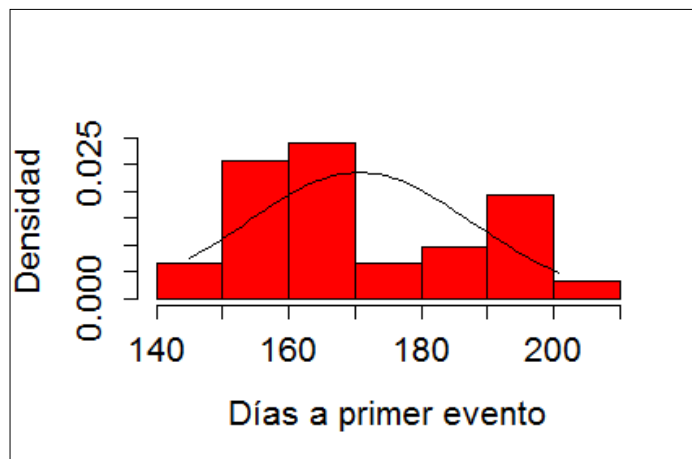
Cuadro No. 28. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Rivera

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 0 | | | | |
| -2 | 5 | 0,7785 | si | 199,4 | 12,5 |
| 0 | 18 | 0,6063 | si | 179,7 | 17,9 |
| 2 | 27 | 0,1003 | si | 159,2 | 15,6 |
| 4 | 28 | 0,3538 | si | 145,5 | 15,5 |

Cuadro No. 29. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Rocha

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 1 | | | | |
| -2 | 18 | 0,736 | si | 199,9 | 25,4 |
| 0 | 31 | 0,01112 | no | 170,6 | 17,0 |
| 2 | 33 | 0,7886 | si | 149,8 | 12,8 |
| 4 | 33 | 0,2514 | si | 130,9 | 14,6 |

Gráfica No. 3. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación Rocha



Cuadro No. 30. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Salto

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 3 | 0,3871 | si | 178,7 | 17,4 |
| -2 | 22 | 0,6334 | si | 189,7 | 22,7 |
| 0 | 30 | 0,1502 | si | 170,4 | 19,3 |
| 2 | 33 | 0,6835 | si | 150,4 | 18,8 |
| 4 | 33 | 0,6871 | si | 132,5 | 17,2 |

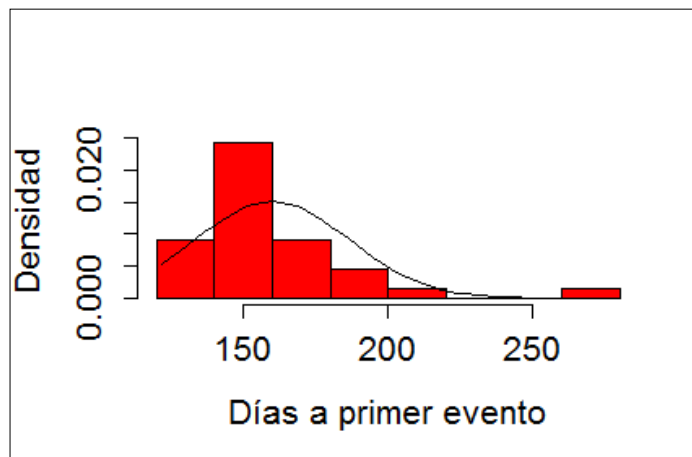
Cuadro No. 31. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Sayago

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 0 | | | | |
| -2 | 2 | | | | |
| 0 | 15 | 0,05547 | si | 180,4 | 18,1 |
| 2 | 32 | 0,7429 | si | 164,7 | 20,4 |
| 4 | 33 | 0,3568 | si | 151,4 | 17,2 |

Cuadro No. 32. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación INIA Treinta y Tres

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|-----------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 7 | 0,742 | si | 200,9 | 27,2 |
| -2 | 24 | 0,06883 | si | 178,9 | 23,0 |
| 0 | 33 | 0,0001364 | no | 160,0 | 26,4 |
| 2 | 33 | 0,8011 | si | 137,4 | 17,7 |
| 4 | 33 | 0,05252 | si | 119,3 | 17,0 |

Gráfica No. 4. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación INIA Treinta y Tres



Cuadro No. 33. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación INIA Las Brujas

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 1 | | | | |
| -2 | 15 | 0,1886 | si | 192,9 | 20,1 |
| 0 | 31 | 0,109 | si | 174,8 | 20,9 |
| 2 | 33 | 0,08269 | si | 151,5 | 15,0 |
| 4 | 33 | 0,9959 | si | 135,0 | 15,8 |

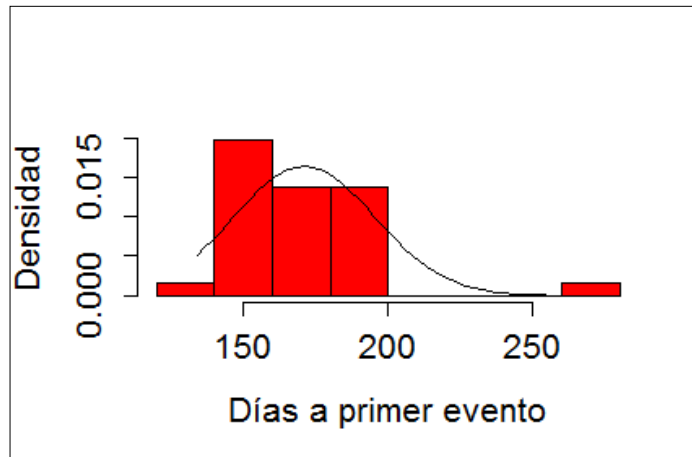
Cuadro No. 34. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación INIA La Estanzuela

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|----------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 0 | | | | |
| -2 | 6 | 0,8336 | Si | 194,5 | 17,4 |
| 0 | 26 | 0,5518 | Si | 179,8 | 17,3 |
| 2 | 33 | 0,003158 | no | 159,5 | 23,1 |
| 4 | 33 | 0,03631 | no | 140,0 | 19,5 |

Cuadro No. 35. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de primeras heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación INIA Salto Grande

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|-----------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 6 | 0,7341 | si | 194,5 | 10,1 |
| -2 | 24 | 0,7263 | si | 184,8 | 16,6 |
| 0 | 33 | 0,0007331 | no | 171,1 | 24,4 |
| 2 | 33 | 0,1277 | si | 145,7 | 21,4 |
| 4 | 33 | 0,1409 | si | 133,0 | 17,5 |

Gráfica No. 5. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación INIA Salto Grande



4.5.2. Resultados de las pruebas de normalidad para últimas heladas

Cuadro No. 36. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Artigas

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 5 | 0,6753 | Si | 189,8 | 21,7 |
| -2 | 19 | 0,7111 | Si | 196,1 | 21,4 |
| 0 | 27 | 0,1664 | Si | 213,3 | 28,3 |
| 2 | 28 | 0,6783 | Si | 239,0 | 22,6 |
| 4 | 28 | 0,1952 | Si | 274,8 | 17,5 |

Cuadro No. 37. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Carrasco

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 1 | | | | |
| -2 | 8 | 0,2551 | si | 202,1 | 32,5 |
| 0 | 26 | 0,9845 | si | 208,3 | 26,0 |
| 2 | 32 | 0,9798 | si | 243,8 | 19,4 |
| 4 | 32 | 0,2246 | si | 269,8 | 17,2 |

Cuadro No. 38. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Melo

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 10 | 0,4605 | si | 197,7 | 25,1 |
| -2 | 27 | 0,6074 | si | 206,6 | 22,3 |
| 0 | 33 | 0,7249 | si | 229,0 | 25,6 |
| 2 | 33 | 0,2076 | si | 266,2 | 17,7 |
| 4 | 33 | 0,2379 | si | 285,5 | 18,2 |

Cuadro No. 39. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Mercedes

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|----------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 21 | 0,6317 | si | 207,8 | 18,8 |
| -2 | 30 | 0,02795 | no | 223,0 | 26,7 |
| 0 | 33 | 0,003727 | no | 248,9 | 23,6 |
| 2 | 33 | 0,5404 | si | 269,5 | 19,9 |
| 4 | 33 | 0,9304 | si | 286,2 | 17,1 |

Cuadro No. 40. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Paso de los Toros

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 0 | | | | |
| -2 | 11 | 0,639 | si | 195,5 | 15,0 |
| 0 | 19 | 0,1843 | si | 209,8 | 28,2 |
| 2 | 19 | 0,5946 | si | 236,3 | 20,6 |
| 4 | 19 | 0,9721 | si | 272,3 | 17,4 |

Cuadro No. 41. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Paysandú

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 0 | | | | |
| -2 | 14 | 0,3758 | si | 199,4 | 21,4 |
| 0 | 31 | 0,4534 | si | 217,8 | 22,6 |
| 2 | 33 | 0,2069 | si | 251,0 | 21,7 |
| 4 | 33 | 0,5132 | si | 271,3 | 16,8 |

Cuadro No. 42. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Rivera

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 0 | | | | |
| -2 | 5 | 0,7977 | si | 199,6 | 12,34 |
| 0 | 18 | 0,1052 | si | 208,3 | 20,49 |
| 2 | 27 | 0,2884 | si | 238,9 | 19,51 |
| 4 | 28 | 0,7447 | si | 260,5 | 20,30 |

Cuadro No. 43. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Rocha

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 1 | | | | |
| -2 | 18 | 0,303 | si | 220,2 | 17,4 |
| 0 | 31 | 0,06553 | si | 238,8 | 24,2 |
| 2 | 33 | 0,7801 | si | 269,3 | 20,7 |
| 4 | 33 | 0,445 | si | 299,2 | 24,1 |

Cuadro No. 44. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Salto

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 3 | 0,443 | si | 197,3 | 13,1 |
| -2 | 22 | 0,4514 | si | 205,8 | 19,7 |
| 0 | 30 | 0,9071 | si | 221,5 | 23,7 |
| 2 | 33 | 0,1115 | si | 244,6 | 20,1 |
| 4 | 33 | 0,1692 | si | 264,9 | 16,6 |

Cuadro No. 45. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación Sayago

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 0 | | | | |
| -2 | 2 | | | | |
| 0 | 15 | 0,5722 | si | 206,7 | 25,4 |
| 2 | 32 | 0,0737 | si | 229,3 | 29,8 |
| 4 | 33 | 0,5291 | si | 259,1 | 21,8 |

Cuadro No. 46. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación INIA Treinta y Tres

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 7 | 0,1771 | si | 208,3 | 21,2 |
| -2 | 24 | 0,4467 | si | 205,3 | 22,8 |
| 0 | 33 | 0,597 | si | 239,6 | 28,3 |
| 2 | 33 | 0,6717 | si | 271,5 | 25,4 |
| 4 | 33 | 0,4216 | si | 298,3 | 18,9 |

Cuadro No. 47. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación INIA Las Brujas

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 1 | | | | |
| -2 | 15 | 0,407 | si | 206,1 | 22,0 |
| 0 | 31 | 0,47 | si | 225,6 | 18,5 |
| 2 | 33 | 0,8644 | si | 254,6 | 17,0 |
| 4 | 33 | 0,05569 | si | 277,9 | 19,8 |

Cuadro No. 48. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación INIA La Estanzuela

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|---------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 0 | | | | |
| -2 | 6 | 0,8336 | si | 194,5 | 17,4 |
| 0 | 26 | 0,9557 | si | 205,9 | 19,6 |
| 2 | 33 | 0,3503 | si | 237,1 | 26,2 |
| 4 | 33 | 0,0469 | no | 268,2 | 16,7 |

Cuadro No. 49. Resultados de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para fechas de ocurrencia de últimas heladas: valor de probabilidad obtenido (p.valor), media (\bar{x}), desvío estándar (s) y la cantidad de datos de la muestra (m), para la estación INIA Salto Grande

| Umbral (° C) | m | p.valor | Normal | \bar{x} (fecha) | s(días) |
|--------------|----|----------|--------|-------------------|---------|
| -4 | 6 | 0,6905 | si | 194,8 | 9,8 |
| -2 | 24 | 0,004656 | no | 200,3 | 17,7 |
| 0 | 33 | 0,3192 | si | 223,9 | 30,2 |
| 2 | 33 | 0,6005 | si | 255,0 | 19,6 |
| 4 | 33 | 0,1074 | si | 273,0 | 18,4 |

4.6. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL CÁLCULO DE PROBABILIDADES ASUMIENDO UNA DISTRIBUCIÓN NORMAL

Como ejemplo de la aplicación de la estimación de probabilidades a través de este método, se utilizaron los datos de las muestras de fechas de ocurrencia de primeras y últimas heladas de la estación Melo, que aparecen en los Cuadros No. 24 y 38, ya que para dicha estación todas las pruebas de normalidad, tanto de primeras como de últimas heladas, y para todos los umbrales, dieron positivas, lo cual permite asumir una distribución normal en todos los casos y calcular probabilidades por este método.

En los Cuadros No. 50 y 51, se muestran las fechas correspondientes a diferentes probabilidades totales (Pt) de ocurrencia de heladas para la estación Melo. Por lo tanto, observando el Cuadro No. 50 se puede decir, por ejemplo, que hasta la fecha 6 de mayo ocurren heladas (con el umbral 0 °C) con un 0,1 o 10% de probabilidad, es decir que una vez cada 10 años ocurre la primera helada hasta el 6 de mayo. También observando el Cuadro No. 51, se puede decir que a partir del 19 de setiembre ocurren heladas (con el umbral 0 °C) con un 0,1 o 10% de probabilidad, es decir que una vez cada 10 años ocurren heladas a partir del 19 de setiembre.

Además, observando el Cuadro No. 50, por ejemplo se puede decir que, si se decide realizar una plantación entre el 14 y el 22 de mayo, existe en ese período, una probabilidad de ocurrencia de heladas (con el umbral 0 °C) de 0,2 a 0,33.

Cuando aparece un guion en la celda es porque una probabilidad total tan alta no existe, ésto se debe a que el factor porcentaje de años con heladas limita el resultado de probabilidad total.

Cuadro No. 50. Fechas hasta la cual ocurren heladas en Melo asumiendo probabilidades totales (Pt) de 0,1; 0,2; 0,33 y 0,5 para los todos umbrales

| Umbral (° C) | Fecha de primera helada con varias Pt | | | |
|--------------|---------------------------------------|-----------|------------|-----------|
| | $x_i 0,1$ | $x_i 0,2$ | $x_i 0,33$ | $x_i 0,5$ |
| -4 | 22-jun. | 17-jul. | - | - |
| -2 | 26-may. | 04-jun. | 12-jun. | 22-jun. |
| 0 | 06-may. | 14-may. | 22-may. | 31-may. |
| 2 | 25-abr. | 02-may. | 08-may. | 15-may. |
| 4 | 05-abr. | 11-abr. | 16-abr. | 22-abr. |

Cuadro No. 51. Fechas a partir de la cual ocurren heladas en Melo asumiendo probabilidades totales (Pt) de 0,1; 0,2; 0,33 y 0,5 para los todos umbrales

| Umbral (° C) | Fecha de última helada con varias Pt | | | |
|--------------|--------------------------------------|-----------|------------|-----------|
| | $x_i 0,1$ | $x_i 0,2$ | $x_i 0,33$ | $x_i 0,5$ |
| -4 | 28-jul. | 07-jul. | - | - |
| -2 | 21-ago. | 11-ago. | 31-jul. | 20-jul. |
| 0 | 19-sep. | 08-sep. | 29-ago. | 18-ago. |
| 2 | 16-oct. | 09-oct. | 01-oct. | 24-sep. |
| 4 | 05-nov. | 28-oct. | 21-oct. | 13-oct. |

4.7. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DESCRIPTIVO DEL EVENTO JUNIO 2012

En principio se realizó una breve descripción del evento extremo de junio 2012, en cada estación meteorológica (Est.) teniendo en cuenta la fecha de ocurrencia, duración en días del evento y la intensidad, entendida como las menores temperaturas alcanzadas, tanto en la mínima (T_{mín.}) como en la máxima (T_{máx.}), como se muestra en los Cuadros No. 52, 53 y 54. Cuando en la celda aparece “sd” corresponde a sin dato.

Además se comparó en cada estación meteorológica: la fecha del evento con el dato de fecha media de primera helada (FMPH), y la mínima temperatura ocurrida en el evento con la temperatura mínima absoluta histórica

(TNabs.Histo.); para tener una idea de que tan extremo y fuera de la media fue el evento; esto se muestra en los Cuadros No. 52, 53 y 54.

Las heladas ocurridas en el evento 2012 se concentran entre los días 6 y 12 de junio. En cuanto a la fecha de ocurrencia del evento 2012, para la mayoría de los casos, ocurrió antes de la fecha media de primera helada, y además, en todos los caso la fecha de ocurrencia de la primera helada del año 2012 se encuentra incluida entre las fechas del evento.

Sólo para algunas estaciones meteorológicas el evento ocurrió luego de la fecha media de ocurrencia de primera helada, tal es el caso de la estación Mercedes, cuya fecha es la más temprana a nivel nacional, el 30 de mayo; también en Melo ocurrió lo mismo, cuya fecha es el 31 de mayo; y en el caso de la estación meteorológica INIA Treinta y Tres la primera helada del evento 2012 ocurrió exactamente en la fecha media de ocurrencia de la primera helada, el 8 de junio

En cuanto a la temperatura mínima absoluta alcanzada durante el evento del 2012, en la mayoría de los casos fue mayor a la mínima histórica de cada estación, por lo que se podría decir que no fue un evento único en cuanto a la intensidad de las temperaturas. Los casos en los que la temperatura mínima histórica fue la registrada en el evento 2012 son los correspondientes a las estaciones Paysandú, Salto e INIA Treinta y Tres.

Cuadro No. 52. Descripción del evento junio 2012 en cuanto a temperatura máxima diaria (T máx.) y temperatura mínima diaria (T mín.); y datos de fecha media de primera helada (FMPH) y temperatura mínima absoluta histórica (TNabs.Histo.), para las estaciones meteorológicas del sur del país

| Est. | Carrasco | | Sayago | | INIA LB | | INIA LE | | Rocha | |
|--------------------|----------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|
| | T máx. | T mín. | T máx. | T mín. | T máx. | T mín. | T máx. | T mín. | T máx. | T mín. |
| 01-jun. | 15,4 | 5 | 15,1 | 5,2 | 15,9 | 2,7 | 18,8 | 5,5 | 16,6 | 4,7 |
| 02-jun. | 15,4 | 7,1 | 19,6 | 12 | 20,8 | 12 | 19,9 | 12,6 | 16,4 | 8,2 |
| 03-jun. | 20,8 | 8,5 | 12,2 | 9 | 12,5 | 5,7 | 14,3 | 8,3 | 19 | 9,7 |
| 04-jun. | 11,8 | 5,5 | 11,5 | 6,1 | 11,7 | 4,9 | 10,2 | 4,9 | 13,6 | 5,2 |
| 05-jun. | 12 | 3,8 | 13 | 3,6 | 13,5 | 2,7 | 12,2 | 3,1 | 12,1 | 3,9 |
| 06-jun. | 13,8 | 4,6 | 6,5 | 5 | 7,3 | 4,3 | 6,2 | 3 | 13,7 | 2,8 |
| 07-jun. | 7,6 | 2,6 | 9,8 | 3,7 | 9,9 | 1,8 | 10,4 | -1,2 | 9,4 | 3,9 |
| 08-jun. | 10,4 | -0,2 | 13,3 | 1 | 11,8 | 0,3 | 12 | 1,1 | 11,1 | 1,1 |
| 09-jun. | 11,2 | -1 | 14 | 0 | 14,3 | -2,1 | 13,6 | 0,2 | 12,6 | -2,6 |
| 10-jun. | 14,4 | 0,8 | 15 | 3,4 | 17 | 0,9 | 16,8 | 2,8 | 14,2 | 0 |
| 11-jun. | 15,4 | 2 | 17,9 | 3,2 | 17,6 | 1,3 | 18,2 | 3,9 | 15,4 | -0,4 |
| 12-jun. | 18 | 6,6 | 20,9 | 5,1 | 21,3 | 6,1 | 17,9 | 9,1 | 17,5 | 3,2 |
| 13-jun. | 21,4 | 7,8 | 23 | 13,7 | 22,9 | 13,2 | 24,1 | 14,2 | 19,8 | 11,1 |
| 14-jun. | 23,3 | 15,8 | 16,9 | 14,8 | 18,9 | 10,7 | 19,3 | 11,8 | 24,3 | 16,8 |
| 15-jun. | 16 | 11 | 13,6 | 10,7 | 14,1 | 9,4 | 12,5 | 9,1 | 21,2 | 12,4 |
| FMPH | 24-jun. | | 29-jun. | | 23-jun. | | 28-jun. | | 19-jun. | |
| TNabs. Histo. (°C) | -4,5 | | -2,3 | | -4,2 | | -3 | | -4 | |

Cuadro No. 53. Descripción del evento junio 2012 en cuanto a temperatura máxima diaria (T máx.) y temperatura mínima diaria (T mín.); y datos de fecha media de primera helada (FMPH) y temperatura mínima absoluta histórica (TNabs.Histo.), para las estaciones meteorológicas del litoral oeste y centro del país

| Est. | Mercedes | | Paysandú | | Salto | | INIA SG | | Paso | |
|--------------------|----------|-------------|----------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|
| | T máx. | T mín. | T máx. | T mín. | T máx. | T mín. | T máx. | T mín. | T máx. | T mín. |
| 01-jun. | 19,6 | 5,9 | 20,3 | 8,4 | 20,5 | 5 | 20,2 | 5,4 | sd | 6,3 |
| 02-jun. | 20,3 | 8,9 | 19,8 | 9,6 | 20,6 | 9 | 21,4 | 10,6 | sd | 8,4 |
| 03-jun. | 22,4 | 7,3 | 22,3 | 7 | 24,8 | 3 | 18,1 | 8,1 | sd | 7,7 |
| 04-jun. | 17,1 | 4,2 | 17 | 4,8 | 19,6 | 5 | 16 | 7,3 | sd | 5 |
| 05-jun. | 13,3 | 2,4 | 14,1 | 6,1 | 17 | 5,4 | 14,5 | 6,5 | sd | 4 |
| 06-jun. | 14,4 | 2 | 14,3 | 7 | 14,8 | 2,4 | 9,7 | 3,3 | sd | 2,6 |
| 07-jun. | 8,5 | -3,9 | 8 | -3,3 | 10 | -5 | 11,5 | -0,4 | sd | -2,5 |
| 08-jun. | 11 | -4,2 | 12,8 | -2,5 | 11,4 | -5,4 | 14 | -0,5 | sd | -2,2 |
| 09-jun. | 14,2 | -5,6 | 13,8 | -1,4 | 15,2 | -5,6 | 15,2 | -1,5 | sd | -3,2 |
| 10-jun. | 14,5 | -2,7 | 14 | 4 | 16,2 | -1,4 | 15,8 | 4,6 | sd | 0,2 |
| 11-jun. | 15,3 | -2,5 | 14,6 | 4,8 | 16,8 | 1 | 17,6 | 5,3 | sd | 1,2 |
| 12-jun. | 19,6 | -0,2 | 20,1 | 11,8 | 19 | 9,8 | 23,4 | 11,5 | sd | 3 |
| 13-jun. | 18,2 | 11,6 | 20,8 | 18,6 | 24,8 | 11,8 | 28,5 | 19,3 | sd | 9 |
| 14-jun. | 25,7 | 13,9 | 27,2 | 16,7 | 30,2 | 17,2 | 28 | 20,1 | sd | 16,5 |
| 15-jun. | 22,6 | 13,9 | 25,4 | 18 | 28,4 | 16,9 | 22,4 | 14,5 | sd | 15,6 |
| FMPH | 30-may. | | 21-jun. | | 19-jun. | | 20-jun. | | 14-jun. | |
| TNabs. Histo. (°C) | -8 | | -3,3 | | -5,6 | | -5,8 | | -3,5 | |

Cuadro No. 54. Descripción del evento junio 2012 en cuanto a temperatura máxima diaria (T máx.) y temperatura mínima diaria (T mín.); y datos de fecha media de primera helada (FMPH) y temperatura mínima absoluta histórica (TNabs.Histo.), para las estaciones meteorológicas del noreste y norte del país

| Est. | INIA TyT | | Melo | | Rivera | | Artigas | |
|--------------------------|----------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|
| | Tmáx. | Tmín. | Tmáx. | Tmín. | Tmáx. | Tmín. | Tmáx. | Tmín. |
| 01-jun. | 16,8 | 3 | 17,8 | 2 | 19,2 | 6,3 | 20,9 | 7 |
| 02-jun. | 18,2 | 9,7 | 17 | 5,4 | 20,2 | 6,2 | 21,7 | 8 |
| 03-jun. | 15 | 6,2 | 20,6 | 7 | 16,6 | 9,8 | 18,8 | 7,6 |
| 04-jun. | 16,2 | 2 | 15 | 4,8 | 15 | 8,7 | 18,2 | 6,8 |
| 05-jun. | 13,6 | 1,2 | 15 | 0 | 12,6 | 4,9 | 16,2 | 2 |
| 06-jun. | 14,1 | 1,2 | 13 | 0 | 12,6 | 2,8 | 14,6 | -1 |
| 07-jun. | 11,4 | 0,2 | 13,8 | -0,6 | 11,4 | -0,4 | 13,9 | -3,2 |
| 08-jun. | 13,2 | -2,2 | 11 | -3,8 | 13,2 | 0,3 | 11,4 | -4,2 |
| 09-jun. | 14 | -5,5 | 12,4 | -6 | 14,9 | -1,8 | 14,9 | -2 |
| 10-jun. | 13,6 | -3,6 | 15,2 | -3,4 | 10,4 | 1,6 | 17,8 | 0,7 |
| 11-jun. | 19,8 | 3,3 | 16,4 | -1 | 18,7 | 4,3 | 13 | 7,4 |
| 12-jun. | 21,4 | 6,1 | 18,9 | 3,4 | 16,8 | 10,4 | 20,6 | 9,8 |
| 13-jun. | 26,6 | 15,9 | 22 | 7,2 | 28,9 | 11,6 | 23,2 | 13 |
| 14-jun. | 25,4 | 15,4 | 29,6 | 17,8 | 24,5 | 16,3 | 30,2 | 19,4 |
| 15-jun. | 20,2 | 13,7 | 27 | 16,3 | 16,9 | 15,8 | 25,9 | 16,2 |
| FMPH | 08-jun. | | 31-may. | | 28-jun. | | 10-jun. | |
| TNabs. Histo. (°C) | -5,5 | | -6,4 | | -2,7 | | -4,5 | |

Por otro lado, se analizó, para cada estación meteorológica, si esa determinada cantidad de días seguidos con heladas, que ocurrieron en el evento extremo 2012, llamada Hds2012, se había repetido en algún momento de la historia, teniendo en cuenta que las series utilizadas en el trabajo constan, en su mayoría, de 33 años, como se muestra en los Cuadros No. 55, 56 y 57.

Como se puede observar en dichos Cuadros, la cantidad de días seguidos con heladas durante el evento 2012 (Hds2012) fue menor hacia el sur del país (entre 1 y 3 días seguidos).

Por otro lado, hacia el litoral oeste y el noreste del país se presentaron la mayor cantidad de días seguidos con heladas, siendo el valor más alto el correspondiente a la estación meteorológica Melo, con 7 días seguidos con heladas. Estos dos sectores del país son también los que se caracterizan por períodos medios con heladas más largos.

En cuanto a si la cantidad de días seguidos con heladas durante el evento 2012 fue una característica que hizo al evento excepcional y extremo, fue estudiado, como se muestra en los Cuadros No. 55, 56 y 57. Para esto se investigó en las series si en cada estación esa determinada cantidad de días seguidos con helada, que aconteció durante el evento 2012 (Hds2012), ya se había repetido en algún momento de la historia de las series analizadas.

En cuanto a este punto, se inspeccionó las series para determinar dos aspectos: en cuántos años de los que se disponen con datos aparecen eventos de esa cantidad de días (Hds2012) o más seguidos con heladas (Años \geq Hds2012); y cuántos eventos en todos los años con datos existen con esa característica (Eventos \geq Hds2012). Además se indagó sobre cuál fue el máximo histórico de días seguidos con heladas y en qué mes y año sucedió (Máx. Hds histo.).

Este estudio dio como resultado, que como era de esperarse en las estaciones ubicadas hacia el sur del país, donde el evento 2012 no fue tan extremo (fueron sólo de 1 a 3 días seguidos con heladas) existieron muchos años con eventos similares y muchos eventos. En las estaciones ubicadas hacia el litoral oeste y centro del país, ya los eventos similares fueron menos comunes, esto se explica porque en esa región del país, durante el evento 2012 se registraron una gran cantidad de días seguidos con heladas, como es el caso de la estación meteorológica Mercedes, en la cual se llegó a 6 días. También en las estaciones ubicadas hacia el noreste y norte del país, los eventos similares a los ocurridos en junio de 2012 fueron pocos en los años que van del 1981 al 2013.

También como en muchas estaciones el máximo histórico de días seguidos con heladas (Máx. Hds histo.) fue registrado en el año 2011, se decidió averiguar cuántos días con heladas hubo en junio del 2011 (Hd junio 2011) y en julio del 2011 (Hd julio 2011) y además se hizo lo mismo para junio y julio 2012 (Hd junio 2012 y Hd julio 2012). Para varias estaciones meteorológicas hubo una gran cantidad de días con heladas durante el invierno 2011 y especialmente en julio de 2012.

Para determinar si el número de días con heladas en los meses de junio y julio, de los años 2011 y 2012, fue excepcional, se compararon con los datos de promedio de días con heladas por mes (Hdm junio y Hdm julio

respectivamente), que se calculó especialmente para este análisis, y que aparece en los Cuadros No. 55, 56 y 57.

Se puede observar que en la mayoría de las estaciones meteorológicas tanto en junio como en julio 2012 se registró un número de heladas superior al promedio. También se puede visualizar que en muchos casos durante julio 2011 se registró también un número superior al promedio.

Cuadro No. 55. Días seguidos con heladas durante el evento 2012 (Hds2012), cantidad de años en los que se han repetido (Años \geq Hds2012) y cantidad de eventos similares (Eventos \geq Hds2012), años totales de las series utilizadas (Años totales), máxima cantidad de días seguidos con heladas histórico (Máx. Hds histo.), días con heladas en junio 2011 (Hd junio 2011), días con heladas en julio 2011 (Hd julio 2011), días con heladas en junio 2012 (Hd junio 2012), días con heladas en julio 2012 (Hd julio 2012), promedio de días con heladas de junio (Hdm junio) y promedio de días con heladas de julio (Hdm julio), para las estaciones meteorológicas del sur del país

| Estación | Carrasco | Sayago | INIA LB | INIA LE | Rocha | |
|------------------------|----------|--------|-------------|---------|-------|-----|
| Hds2012 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | |
| Años \geq Hds2012 | 10 | 15 | 31 | 26 | 6 | |
| Eventos \geq Hds2012 | 19 | 39 | 188 | 88 | 7 | |
| Años totales | 32 | 33 | 33 | 33 | 33 | |
| Máx. Hds histo. | Hds | 4 | 2 | 4 | 4 | 5 |
| | Mes | 6 y 7 | 6 y 7 | 7 | 7 | 7 |
| | Año | 96' | 89' 96' 07' | 07' 09' | 88' | 09' |
| Hd junio 2011 | 2 | 0 | 2 | 0 | 1 | |
| Hd julio 2011 | 1 | 0 | 3 | 4 | 2 | |
| Hd junio 2012 | 2 | 1 | 1 | 1 | 4 | |
| Hd julio 2012 | 9 | 1 | 11 | 6 | 10 | |
| Hdm junio | 1,1 | 0,4 | 1,3 | 0,7 | 1,5 | |
| Hdm julio | 1,6 | 0,6 | 2,7 | 1,5 | 2,9 | |

Cuadro No. 56. Días seguidos con heladas durante el evento 2012 (Hds2012), cantidad de años en los que se han repetido (Años \geq Hds2012) y cantidad de eventos similares (Eventos \geq Hds2012), años totales de las series utilizadas (Años totales), máxima cantidad de días seguidos con heladas histórico (Máx. Hds histo.), días con heladas en junio 2011 (Hd junio 2011), días con heladas en julio 2011 (Hd julio 2011), días con heladas en junio 2012 (Hd junio 2012), días con heladas en julio 2012 (Hd julio 2012), promedio de días con heladas de junio (Hdm junio) y promedio de días con heladas de julio (Hdm julio), para las estaciones meteorológicas del litoral oeste y centro del país

| Estación | Mercedes | Paysandú | Salto | INIA SG | Paso | |
|------------------------|----------|----------|-------|---------|------|-----|
| Hds2012 | 6 | 3 | 4 | 3 | 3 | |
| Años \geq Hds2012 | 8 | 13 | 10 | 16 | 6 | |
| Eventos \geq Hds2012 | 8 | 21 | 11 | 19 | 11 | |
| Años totales | 33 | 33 | 33 | 33 | 19 | |
| Máx. Hds histo. | Hds | 13 | 5 | 8 | 7 | 7 |
| | Mes | 6 y 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| | Año | 09' 11' | 89' | 11' | 11' | 11' |
| Hd junio 2011 | 5 | 1 | 2 | 1 | 2 | |
| Hd julio 2011 | 10 | 6 | 9 | 7 | 7 | |
| Hd junio 2012 | 6 | 3 | 4 | 3 | 3 | |
| Hd julio 2012 | 16 | 10 | 14 | 7 | 12 | |
| Hdm junio | 4,7 | 1,5 | 1,9 | 1,9 | 1,5 | |
| Hdm julio | 6,3 | 3,1 | 3,6 | 3,3 | 3,4 | |

Cuadro No. 57. Días seguidos con heladas durante el evento 2012 (Hds2012), cantidad de años en los que se han repetido (Años \geq Hds2012) y cantidad de eventos similares (Eventos \geq Hds2012), años totales de las series utilizadas (Años totales), máxima cantidad de días seguidos con heladas histórico (Máx. Hds histo.), días con heladas en junio 2011 (Hd junio 2011), días con heladas en julio 2011 (Hd julio 2011), días con heladas en junio 2012 (Hd junio 2012), días con heladas en julio 2012 (Hd julio 2012), promedio de días con heladas de junio (Hdm junio) y promedio de días con heladas de julio (Hdm julio), para las estaciones meteorológicas del noreste y norte del país

| Estación | INIA TyT | Melo | Rivera | Artigas | |
|------------------------|----------|------|--------|---------|-----|
| Hds2012 | 3 | 7 | 1 | 4 | |
| Años \geq Hds2012 | 19 | 3 | 18 | 5 | |
| Eventos \geq Hds2012 | 41 | 3 | 72 | 5 | |
| Años totales | 33 | 33 | 28 | 28 | |
| Máx. Hds histo. | Hds | 7 | 9 | 4 | 6 |
| | Mes | 7 | 7 | 6 | 7 |
| | Año | 12' | 11' | 02' | 11' |
| Hd junio 2011 | 2 | 3 | 1 | 2 | |
| Hd julio 2011 | 6 | 9 | 3 | 6 | |
| Hd junio 2012 | 3 | 7 | 1 | 4 | |
| Hd julio 2012 | 11 | 13 | 0 | 5 | |
| Hdm junio | 3,5 | 3,9 | 0,6 | 2,1 | |
| Hdm julio | 4,5 | 4,8 | 1,4 | 3,2 | |

También se estudió la cantidad de días seguidos que se registraron con temperaturas iguales o menores a $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante el evento 2012, y se realizó el mismo análisis que para el umbral $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, como se muestra en los Cuadros No. 58, 59 y 60. En algunas estaciones no se registraron temperaturas tan bajas, tal es el caso de Carrasco, Sayago e INIA La Estanzuela, que se ubican al sur del país donde el evento no fue tan extremo. Además en las estaciones INIA Salto Grande y Rivera tampoco se alcanzó el umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Por otro lado, en un gran número de estaciones meteorológicas, sobre todo del sector noreste, norte, litoral oeste y centro (Mercedes, Paysandú, Paso de los Toros, INIA Treinta y Tres y Artigas), el mayor número de días seguidos con heladas por debajo del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, desde 1981 al 2013, fue registrado en

el año 2012. También en la estación Rocha se registró en el año 2012, aunque se trata de tan sólo un día con temperaturas por debajo de -2 °C.

Cuadro No. 58. Días seguidos con temp. de -2 °C o menos durante el evento 2012 (Hds2012), cantidad de años en los que se han repetido (Años>=Hds2012) y cantidad de eventos similares (Eventos>=Hds2012), días con temp. de -2 °C o menos en junio 2011 (Hd junio 2011), días con temp. de -2 °C o menos en julio 2011 (Hd julio 2011), días con temp. de -2 °C o menos en junio 2012 (Hd junio 2012), días con temp. de -2 °C o menos en julio 2012 (Hd julio 2012), promedio de días con temp. de -2 °C o menos de junio (Hdm junio) y promedio de días con temp. de -2 °C o menos de julio (Hdm julio), para las estaciones meteorológicas del sur del país

| Estación | Carrasco | Sayago | INIA LB | INIA LE | Rocha | |
|------------------|----------|--------|---------|---------|-------|-----------------|
| Hds2012 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | |
| Años>=Hds2012 | | | 15 | | 18 | |
| Eventos>=Hds2012 | | | 26 | | 43 | |
| Años totales | 32 | 33 | 33 | 33 | 33 | |
| Máx. Hds histo. | Hds | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 |
| | Mes | | | 6 y 7 | | 6, 7 y 9 |
| | Año | | | 96' 07' | | 98' 07' 09' 12' |
| Hd junio 2011 | | | 0 | | 0 | |
| Hd julio 2011 | | | 1 | | 0 | |
| Hd junio 2012 | | | 1 | | 1 | |
| Hd julio 2012 | | | 3 | | 4 | |
| Hdm junio | | | 0,2 | | 0,2 | |
| Hdm julio | | | 0,5 | | 0,7 | |

Cuadro No. 59. Días seguidos con temp. de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ o menos durante el evento 2012 (Hds2012), cantidad de años en los que se han repetido (Años \geq Hds2012) y cantidad de eventos similares (Eventos \geq Hds2012), días con temp. de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ o menos en junio 2011 (Hd junio 2011), días con temp. de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ o menos en julio 2011 (Hd julio 2011), días con temp. de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ o menos en junio 2012 (Hd junio 2012), días con temp. de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ o menos en julio 2012 (Hd julio 2012), promedio de días con temp. de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ o menos de junio (Hdm junio) y promedio de días con temp. de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ o menos de julio (Hdm julio), para las estaciones meteorológicas del litoral oeste y centro del país

| Estación | Mercedes | Paysandú | Salto | INIA SG | Paso | |
|------------------------|----------|----------|---------------------|---------|------|-----|
| Hds2012 | 5 | 2 | 3 | 0 | 3 | |
| Años \geq Hds2012 | 1 | 6 | 4 | | 1 | |
| Eventos \geq Hds2012 | 1 | 6 | 6 | | 1 | |
| Años totales | 33 | 33 | 33 | 33 | 19 | |
| Máx. Hds histo. | Hds | 5 | 2 | 6 | 0 | 3 |
| | Mes | 6 | 6, 7 y 8 | 7 | | 6 |
| | Año | 12' | 88' 07' 08' 10' 12' | 11' | | 12' |
| Hd junio 2011 | 1 | 0 | 1 | | 0 | |
| Hd julio 2011 | 6 | 0 | 6 | | 1 | |
| Hd junio 2012 | 5 | 2 | 3 | | 3 | |
| Hd julio 2012 | 10 | 1 | 9 | | 2 | |
| Hdm junio | 2 | 0,2 | 0,4 | | 0,4 | |
| Hdm julio | 3 | 0,4 | 1,4 | | 0,6 | |

Cuadro No. 60. Días seguidos con temp. de -2 °C o menos durante el evento 2012 (Hds2012), cantidad de años en los que se han repetido (Años>=Hds2012) y cantidad de eventos similares (Eventos>=Hds2012), días con temp. de -2 °C o menos en junio 2011 (Hd junio 2011), días con temp. de -2 °C o menos en julio 2011 (Hd julio 2011), días con temp. de -2 °C o menos en junio 2012 (Hd junio 2012), días con temp. de -2 °C o menos en julio 2012 (Hd julio 2012), promedio de días con temp. de -2 °C o menos de junio (Hdm junio) y promedio de días con temp. de -2 °C o menos de julio (Hdm julio), para las estaciones meteorológicas del noreste y norte del país

| Estación | INIA TyT | Melo | Rivera | Artigas |
|------------------|----------|---------------------|--------|---------|
| Hds2012 | 3 | 3 | 0 | 3 |
| Años>=Hds2012 | 5 | 8 | | 1 |
| Eventos>=Hds2012 | 5 | 11 | | 1 |
| Años totales | 33 | 33 | 28 | 28 |
| Máx. Hds histo. | Hds | 3 | 5 | 0 |
| | Mes | 6, 7 y 9 | 7 | |
| | Año | 88' 89' 96' 09' 12' | 11' | |
| Hd junio 2011 | 1 | 1 | | 1 |
| Hd julio 2011 | 1 | 5 | | 3 |
| Hd junio 2012 | 3 | 3 | | 3 |
| Hd julio 2012 | 3 | 7 | | 0 |
| Hdm junio | 0,8 | 1,6 | | 0,6 |
| Hdm julio | 1,4 | 2,1 | | 1 |

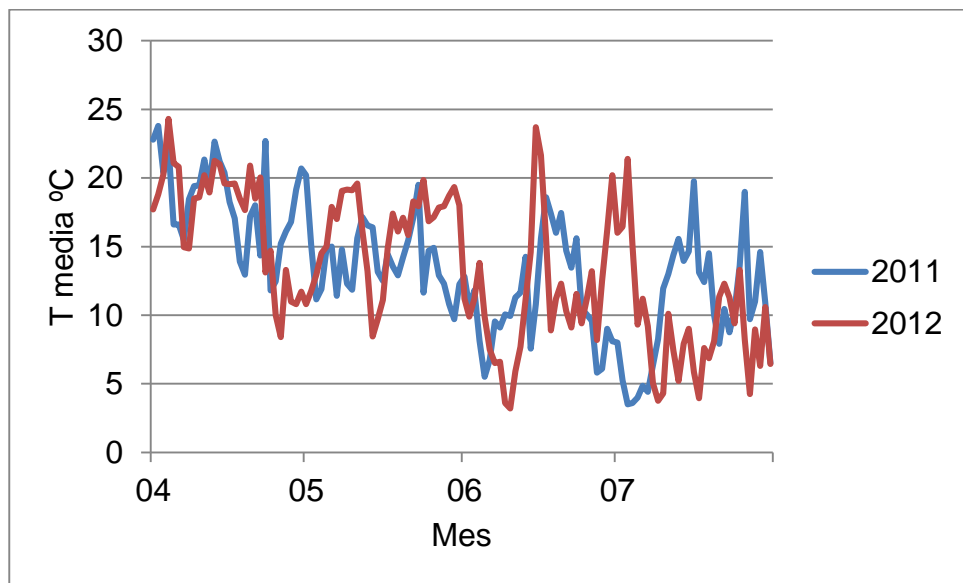
Por último se analizaron las condiciones meteorológicas previas al evento de junio 2012, para lo cual se graficó la temperatura media desde abril a julio de los años 2012 y del 2011, para comparar esos dos años particulares en cuanto a las heladas; esto se hizo para varias estaciones de diferentes regiones del país que se asocian con la producción forestal y citrícola, que fueron muy perjudicadas durante el evento junio 2012. Además se graficó la temperatura media de la estación Carrasco para observar cómo fue el comportamiento de la temperatura media durante el evento 2012 en la región sur del país. En las Gráficas No. 6, 7, 8, 9, 10 y 11 se muestran los resultados.

En dichas gráficas se observa el evento de junio 2012 como un pico pronunciado de la temperatura media, que baja hasta los valores cercano a 5 °C, y en algunos casos, como el de las estaciones Melo e INIA Treinta y Tres,

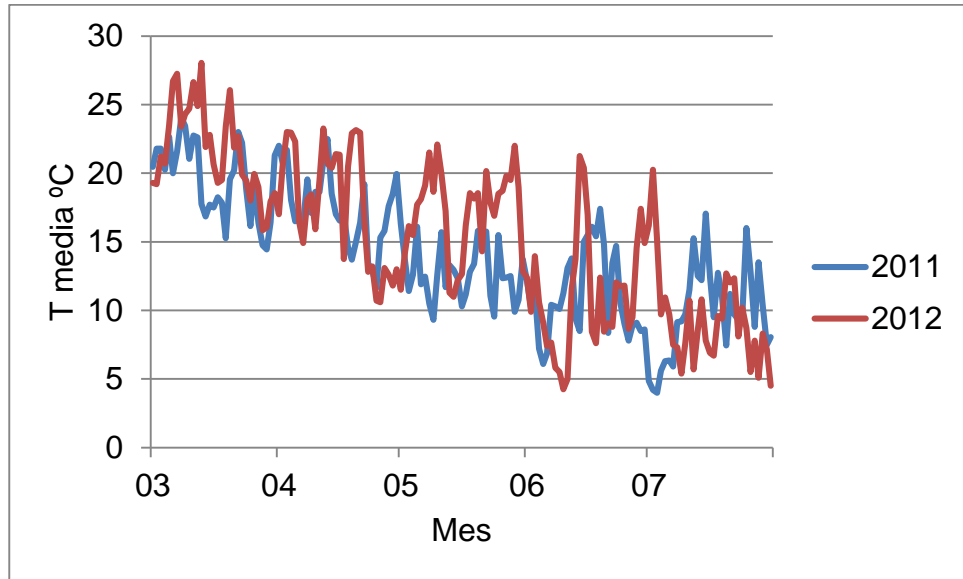
es el pico más bajo del año, como se muestra en las Gráficas No. 6 y 7; aunque en la estación Melo también se observa un pico de una magnitud parecida en julio del 2012.

En las gráficas también se puede observar que las temperaturas medias diarias del mes de mayo 2012, previo al evento, fueron considerablemente mayores a las del 2011 y mayores a 15 °C, llegando a los 20 °C en varios días.

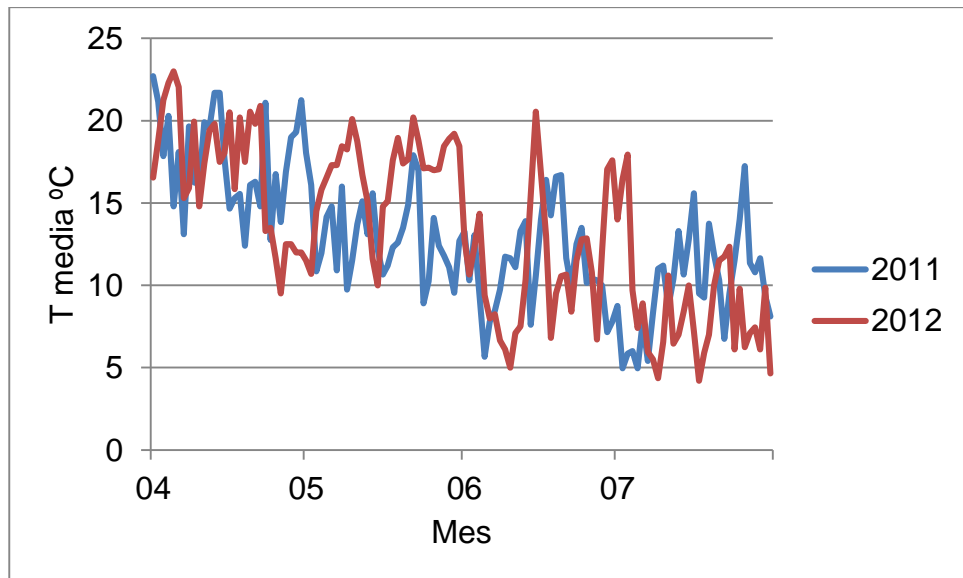
Gráfica No. 6. Temperatura media diaria durante abril, mayo, junio y julio, de los años 2011 y 2012 en la estación meteorológica Melo



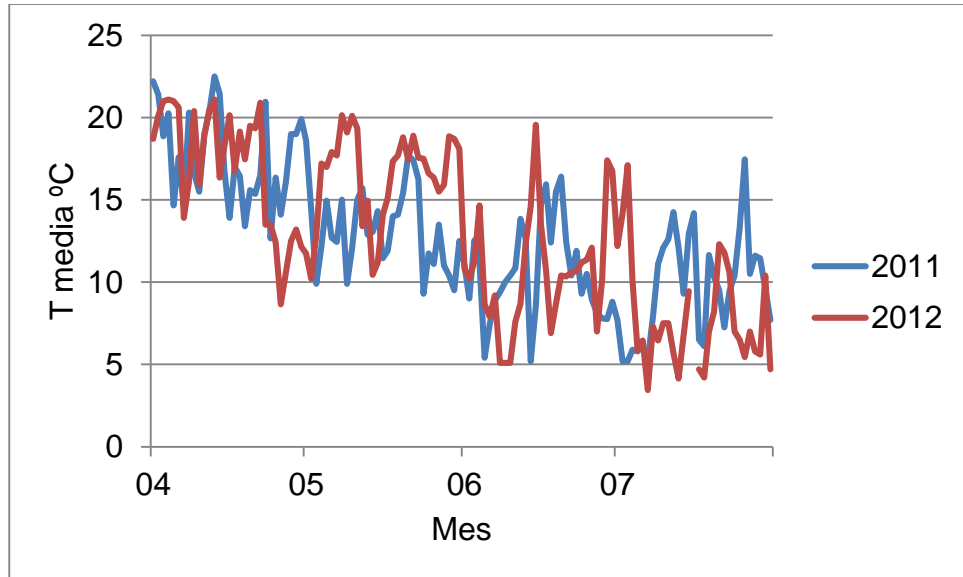
Gráfica No. 7. Temperatura media diaria durante abril, mayo, junio y julio, de los años 2011 y 2012 en la estación meteorológica INIA Treinta y Tres



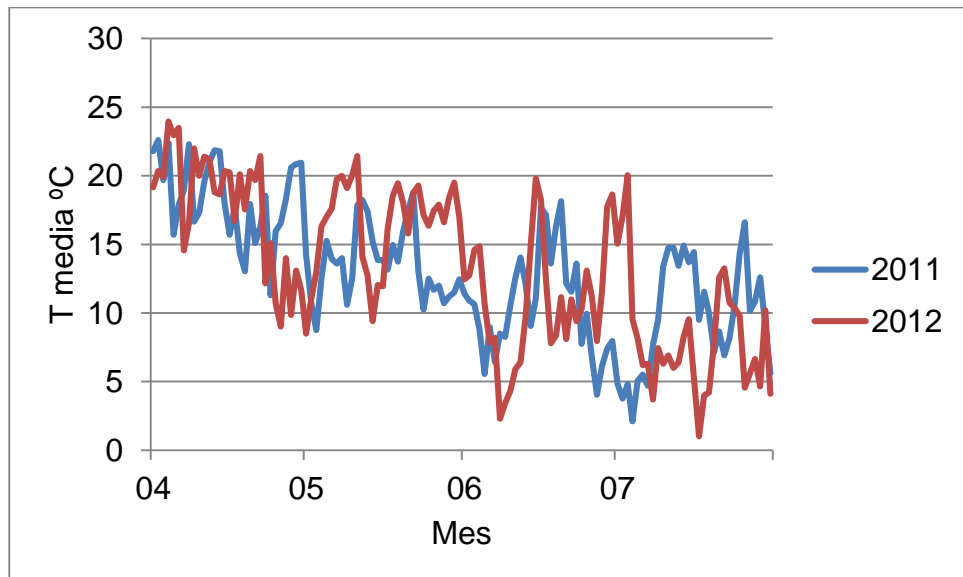
Gráfica No. 8. Temperatura media diaria durante abril, mayo, junio y julio, de los años 2011 y 2012 en la estación meteorológica Rocha



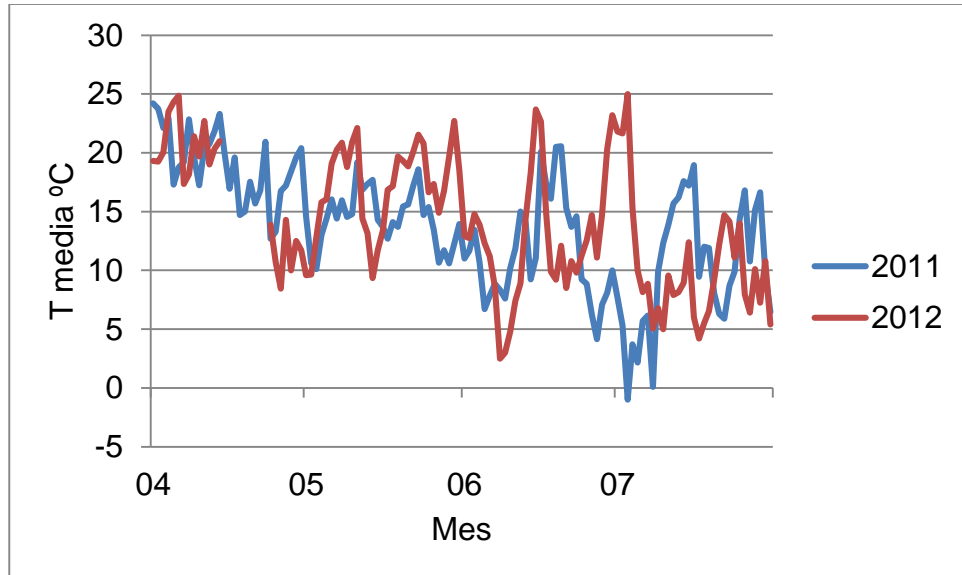
Gráfica No. 9. Temperatura media diaria durante abril, mayo, junio y julio, de los años 2011 y 2012 en la estación meteorológica Carrasco



Gráfica No. 10. Temperatura media diaria durante abril, mayo, junio y julio, de los años 2011 y 2012 en la estación meteorológica Mercedes



Gráfica No. 11. Temperatura media diaria durante abril, mayo, junio y julio, de los años 2011 y 2012 en la estación meteorológica Salto

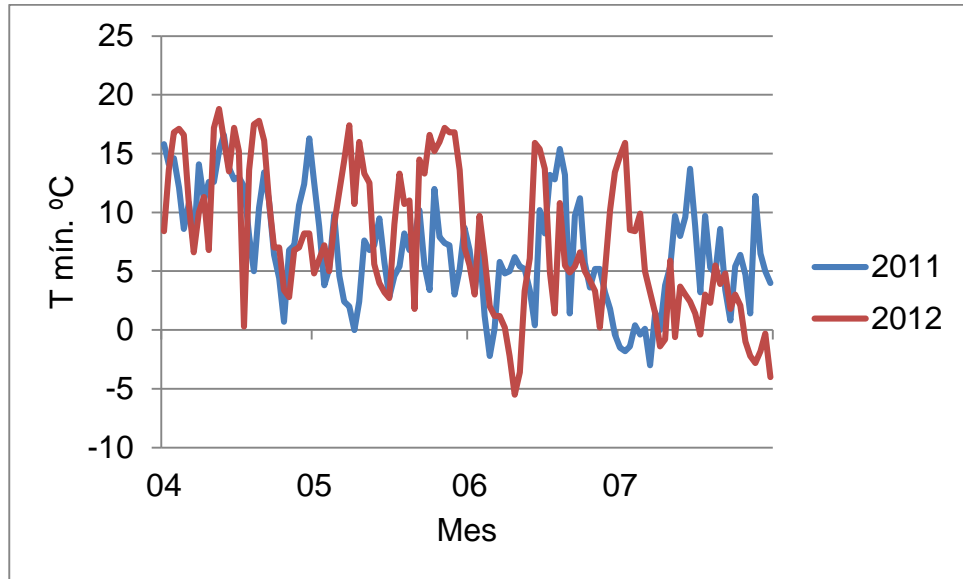


Por último se elaboraron gráficas para ver el comportamiento de la temperatura mínima en el período previo al evento 2012, como se muestra en las Gráficas No. 12 y 13.

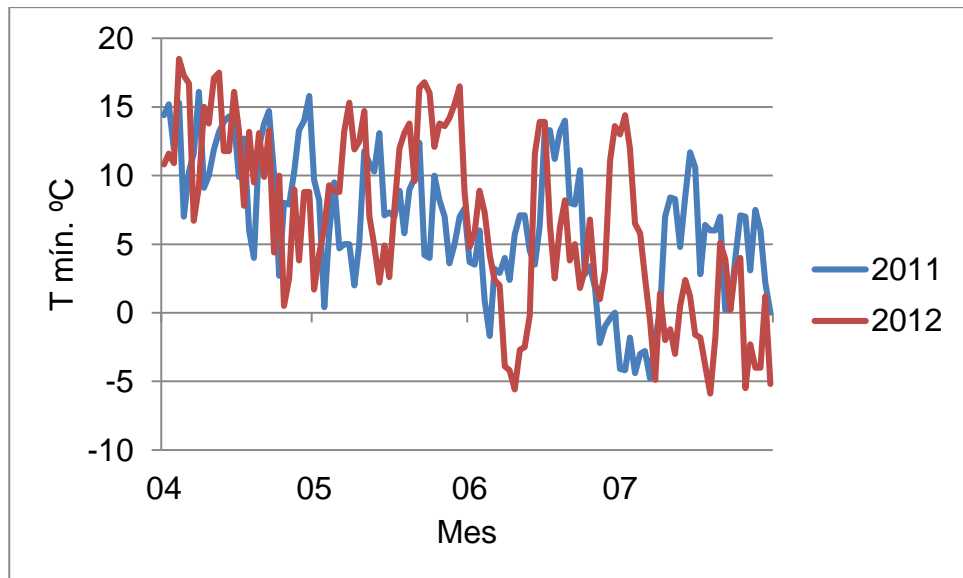
En la Gráfica No. 12 se observa el comportamiento de la temperatura mínima en la estación INIA Treinta y Tres previo al evento junio 2012. Se puede observar que ésta presentaba un valor de 17,2 °C el 27 de mayo de 2012, luego, a partir de ese día la temperatura descendió bruscamente, hasta -5,5 °C el 10 de junio.

En la Gráfica No. 13 se observa el comportamiento de la temperatura mínima en la estación Mercedes, y se puede ver un comportamiento similar al que ocurrió en la estación INIA Treinta y Tres, ya que el 23 de mayo de 2012 la temperatura mínima era de 16,8 °C, a partir de ahí comenzó una caída que terminó el 10 de junio con un valor de -5,6 °C.

Gráfica No. 12. Temperatura mínima diaria durante abril, mayo, junio y julio, de los años 2011 y 2012 en la estación meteorológica INIA Treinta y Tres



Gráfica No. 13. Temperatura mínima diaria durante abril, mayo, junio y julio, de los años 2011 y 2012 en la estación meteorológica Mercedes



5. DISCUSIÓN

5.1. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA TEMPERATURA

La mayor amplitud térmica anual que existe en las estaciones meteorológicas ubicadas hacia el noreste, norte, litoral este y centro del país, comparado con la amplitud encontrada en las estaciones del sur, podría deberse a que dichas regiones se encuentran en áreas del territorio nacional más continentales, por lo cual no presentan el efecto moderador sobre la temperatura y sus fluctuaciones, que provee la cercanía al mar, efecto citado por Burgos (1963), FAO (2010).

Teniendo en cuenta a la temperatura mínima anual media (TNAM) y la temperatura mínima absoluta histórica (TNabs.Histo.) se puede observar que en las estaciones del sur del país los fríos son menos intensos, comparado con las estaciones ubicadas hacia el noreste, norte, litoral oeste y centro, lo cual también podría deberse al efecto regulador del mar sobre la temperatura, citado por Burgos (1963), FAO (2010).

5.2. PARÁMETROS MEDIOS ESTIMADOS DEL RÉGIMEN AGROCLIMÁTICO DE HELADAS

El régimen agroclimático de heladas tiene el objetivo de poder caracterizar las diferentes estaciones meteorológicas del país en estudio en cuanto a las heladas, ya que como se mencionó en la revisión bibliográfica, los valores medios que se estiman de fecha de ocurrencia de primera y última helada, y el período medio libre de heladas, dan de por sí y por comparación una primera idea sobre la relativa peligrosidad de las heladas en las diferentes estaciones, esto está asociado al cambio en la sensibilidad de los vegetales durante las estaciones de otoño y primavera, por lo cual puede aportar información útil para la toma de decisiones agronómicas (Burgos, 1963).

Pero en este caso, la caracterización del todo el país se elaboró con tan sólo 14 puntos (estaciones meteorológicas), dejando sin cubrir gran parte del territorio, sobre todo la zona central, por lo que el régimen que surja puede ser de utilidad pero tiene ciertas limitaciones.

Además las condiciones microclimáticas, que afectan la ocurrencia y severidad de las heladas por pérdida de radiación, varían considerablemente con las condiciones locales de topografía y vegetación (además de las condiciones generales de la atmosfera) (Rosenberg et al., 1983). Por lo tanto, si

en una determinada estación meteorológica se presentan condiciones no representativas de la región, esto puede generar que los resultados obtenidos no sean los que caracterizan a la región correctamente, ya que dichas condiciones pueden estar influyendo en los datos, a partir de los cuales se estiman los parámetros, lo que puede generar que el régimen que surja no sea del todo representativo de la región (Rosenberg et al. 1983, Corsi y Genta 1992, Burgos 1993, Prado, citado por Balmelli 1993, FAO 2010, UdelaR. FA 2010).

Por ejemplo si se observa en un mapa la estación agrometeorológica INIA Salto Grande se puede ver que se encuentra en una zona cercana (apenas a 2 km) al lago del embalse de la represa del mismo nombre (de 783 km² de superficie); por otro lado las estaciones INIA Treinta y Tres y Melo se ubican en una región de relieve más irregular, todos estos factores pueden estar sesgando los datos, aunque no hay estudios específicos al respecto.

También se pueden presentar otros factores como por ejemplo la existencia de cortinas de árboles o bosques de árboles que puede estar influyendo en la estratificación y acumulación del aire frío. Por estas razones se propone estudiar, en posteriores trabajos, las posibles influencias que tienen las características de las estaciones del país sobre los datos registrados en éstas (Rosenberg et al. 1983, Corsi y Genta 1992, Burgos 1993, Prado, citado por Balmelli 1993, FAO 2010, UdelaR. FA 2010).

Por otro lado, teniendo en cuenta las referencias citadas en la revisión bibliográfica, en cuanto a la diferencia que existe en la temperatura mínima a diferentes alturas del suelo durante las noches con heladas en las cuales hay inversión térmica, y considerando también la altura de los cultivos y los umbrales de daños de éstos, se caracterizó a las heladas de un modo más completo eligiendo diferentes umbrales para procesar los datos de temperatura mínima a nivel de casilla y no sólo el umbral 0 °C. Umbrales de temperaturas positivas a nivel de casilla pueden significar un umbral de daño a una menor altura. Además se incluyeron umbrales negativos para procesar la información medida en casilla, ya que un determinado umbral negativo a nivel de casilla puede significar a nivel de suelo o simplemente a una altura más baja, un umbral de supervivencia de determinada especie (Alarcón Velazco y Trebejo Varillas, 2010).

Con respecto a esto, se debe mencionar que la inversión térmica y la estratificación del aire cercano al suelo sólo se da en noche en las cuales ocurren heladas con un componente radiativo significativo, que de todos modos, son el tipo de heladas más comunes en el país (mixtas), pero debe considerarse que este aspecto no puede tenerse en cuenta cuando el evento es advectivo (FAO 2010, UdelaR. FA 2010).

Además la diferencia de temperatura que existe a las diferentes alturas durante un perfil de inversión térmica, es decir las características del gradiente que se forma, fue estimada por varios autores (Corsi y Genta 1992, Sentelhas et al. 1995, Villegas y Rosas, citados en Alarcón Velazco y Trebejo Varillas 2010, Castaño et al. 2011), pero se trata de un valor aproximado, por lo que no en todos los casos se forma una estratificación con las mismas características. Los factores micrometeorológicos que determinan las características de las heladas pueden variar en poca distancia y determinar variaciones en el techo de la inversión y en las características de la estratificación (Perry, citado por FAO, 2010).

De todas maneras el régimen de heladas realizado con varios umbrales puede tener su utilidad para la toma de decisiones en las actividades agrícolas y forestales. Por ejemplo el período con heladas medio (PMCH) para el umbral -4 y -2 °C puede contribuir a los criterios en la definición de los momentos de plantaciones forestales; un PMCH con estos umbrales representa un período de alto riesgo de temperaturas extremas bajas registradas a nivel de suelo o en alturas de plantas recién instaladas en campo y con niveles térmicos inferiores a los umbrales de supervivencia reportados para varias especies forestales, como por ejemplo *E. grandis* (Corsi y Genta 1992, Sentelhas et al. 1995, Villegas y Rosas, citados en Alarcón Velazco y Trebejo Varillas 2010, Castaño et al. 2011).

En cuanto a las caracterizaciones realizadas con los umbrales 2 y 4 °C, fueron hechas pensando en casos donde las temperaturas críticas de las plantas y la altura a la que se encuentren, ameriten evaluar el comportamiento de temperaturas mayores a 0 °C. Por ejemplo teniendo en cuenta que una especie presenta daños por heladas importantes con temperaturas del aire de 0 °C y durante el primer año desde que fue plantada, presentan alturas de aproximadamente 0,5 m; se puede tener en cuenta el comportamiento del umbral 2 °C ya que ese valor a nivel de casilla puede representar un valor de 0 °C a nivel de planta.

Este razonamiento se puede aplicar a otros casos, como por ejemplo teniendo en cuenta a la especie *E. grandis*, que puede presentar daños significativos por heladas con temperaturas de aire de -2 °C, y durante los primeros 3 meses luego de la plantación, período durante el cual es más vulnerable a los daños por heladas, presentan alturas alrededor de los 0,5 m, se puede inspeccionar el comportamiento del umbral 0 °C, ya que ese valor a nivel de casilla puede representar un valor de -2 °C a nivel de planta (Pitz Floriani et al., 2013).

Con respecto a las características de las heladas en Uruguay, haciendo una comparación con antecedentes revisados, se puede decir que, en general, se reafirman las tendencias espaciales y temporales en el país, que fueron

presentadas en trabajos anteriores como el de Boshell y Chiara (1982), Castaño et al. (2011), de Mello (2013), y los mapas elaborados por Chiara, Aramburú, Paradedá, que aparecen en Bossi (1995). Las estaciones meteorológicas del sur del país presentan un menor período medio con heladas y son menos peligrosas, ya que las fechas medias de ocurrencia de primeras heladas son las más tardías por lo que encuentran a las plantas más endurecidas, y las fechas medias de ocurrencia de últimas heladas son las más tempranas con lo cual sucede lo mismo, mientras que en las estaciones meteorológicas ubicadas hacia el litoral oeste, centro y noreste del país se da el mayor período medio con heladas y a su vez son las más peligrosas, ya que las fechas medias de ocurrencia de primeras heladas son las más tempranas y las fechas medias de ocurrencia de últimas heladas son las más tardías y en las estaciones ubicadas hacia el norte, también hay un período medio con heladas muy extendido en el tiempo, pero menor que en las regiones anteriores.

Esta tendencia que se presenta en el país, con un menor período con heladas medio en el sur, podría deberse al efecto moderador del ambiente marítimo sobre la humedad y la temperatura, y por tanto de las fluctuaciones de la temperatura y la formación del rocío o escarcha, citado por Burgos (1963), FAO (2010). Este concepto del efecto de la continentalidad ya aparece referido en trabajos nacionales como el de Cruz et al. (2000).

El gradiente espacial obtenido para los diferentes parámetros del régimen agroclimático de heladas resultó de procesar tan sólo 14 puntos georreferenciados, lo cual pudo haber limitado la interpolación, sobre todo porque en la zona central del territorio nacional hay escasos puntos. Igualmente existe la oportunidad para que se agreguen más puntos de otras estaciones, necesarios para la generación de mapas más precisos y representativos de los eventos de heladas en el país. Los mapas con isolíneas que se presentan en el trabajo sólo pretenden ser una primera aproximación del comportamiento de éstas. Además se debe mencionar que siendo que en el trabajo se utiliza el método de interpolación de ponderación inversa a las distancia es posible también explorar la pertinencia de utilizar otros métodos de interpolación espacial para estos parámetros en el país.

5.3. VALORES EXTREMOS DEL RÉGIMEN AGROCLIMÁTICO DE HELADAS

La caracterización de los valores extremos del régimen de heladas se hizo de forma de complementar el trabajo y de hacerlo más detallado.

Las fechas extremas de ocurrencia de primera y última helada (FEPH y FEUH) sirven para tener una idea de la fecha más peligrosa esperada en cada una de las estaciones.

Los períodos extremos con y libre de heladas (PECH y PELH), se pueden utilizar si se desea asumir el menor riesgo de ocurrencia de heladas, ya que determinan, los períodos históricos con y sin heladas máximos.

Los valores menos extremos de fechas de ocurrencia de primera y última heladas se dan en las estaciones meteorológicas ubicadas hacia el sur del país, lo cual, también podría explicarse por el efecto regulador del mar sobre la temperatura (Burgos 1963, FAO 2010).

5.4. CARACTERIZACIÓN DE LA PELIGROSIDAD DE LAS HELADAS OTOÑALES Y PRIMAVERALES

Para calcular el ICK de las primeras y últimas heladas, antes se debió calcular la fecha hasta y después de la cual, para primera y última respectivamente, ocurren heladas con un 20 % de probabilidad, en este caso se utilizó el método empírico o de frecuencias acumuladas.

Utilizando este método, también se pueden explorar resultados asumiendo distintas probabilidades, que luego se pueden aplicar en la gestión de las actividades agrícolas, por ejemplo en la definición de fechas de plantación a un determinado riesgo de ocurrencia de heladas.

Con respecto a los resultados de los ICK de otoño y primavera, para las diferentes estaciones meteorológicas se puede observar que las estaciones ubicadas hacia el sur del país presentan valores de ICK de primeras (ICK P) y últimas heladas (ICK U) menores, sobre todo los correspondientes a estaciones próximas al mar como Carrasco, Sayago e INIA La Estanzuela.

Por lo tanto, según Burgos (1963), podría decirse que la peligrosidad de las heladas otoñales (o primeras) y primaverales (o últimas) es menor hacia el sur del país. Lo que concuerda con lo citado por Burgos (1963) ya que en el sur es donde hay menor amplitud térmica anual y donde se dan los valores más bajos de ICK de primeras y últimas heladas.

Por otro lado, los mayores valores de ICK de primeras y últimas heladas se encuentran en las estaciones meteorológicas ubicadas hacia el litoral oeste, centro, noreste y norte del país. La ubicación más continental de estas estaciones podría explicar en parte la mayor amplitud térmica anual y por lo tanto mayor tensión térmica en otoño y primavera, lo que provocaría que los valores de ICK de primeras y últimas heladas sean los mayores a nivel

nacional, lo que concuerda con los conceptos citados en Burgos (1963), FAO (2010).

En conclusión se podría decir que la peligrosidad de las heladas otoñales y primaverales es menor en el sur y mayor hacia el litoral oeste, centro, noreste y norte del país.

La inclusión del período de peligrosidad en este estudio, representa el primer trabajo a nivel nacional de este indicador y mediante el cual no se constató una clara tendencia o gradiente del mismo en el territorio nacional. Este aspecto indicaría una restricción en su utilidad como un indicador relevante en el régimen agroclimático de heladas en el país. Esto habilita a futuros trabajos que permitan evaluar la utilidad de adaptar este indicador al régimen agroclimático de heladas, y atentos a que su creación y mejor ajuste corresponden a regiones continentales de gran dimensión.

5.5. PRUEBAS DE NORMALIDAD Y CÁLCULOS DE PROBABILIDAD ASUMIENDO UNA DISTRIBUCIÓN NORMAL

No se pudo realizar la prueba de normalidad en algunas muestras de fechas de ocurrencia de primeras y últimas heladas, porque la cantidad de datos de estas era menor a 3, por ejemplo en algunos casos correspondientes al umbral -4 y -2 °C; esto se debe a que en la estación meteorológica no se presentaron suficientes años con temperaturas tan bajas, igual o menores a -4 o -2 °C.

En el caso de la estación meteorológica Paso de los Toros, no se pudo realizar la prueba de normalidad para el umbral -4 °C, esto puede deberse a la falta de años con datos de la serie. Dicha estación meteorológica está ubicada en una zona del país mediterránea, que se caracteriza por presentar temperaturas extremas, pero de la cual sólo se cuenta con 19 años con datos de temperatura mínima, esto puede limitar las oportunidades de disponer de eventos de temperaturas , iguales o menores a -4 °C.

El único caso en que no se pudo realizar la prueba de normalidad en las muestras de fechas de ocurrencia de primeras y últimas heladas del umbral -2 °C fue para la estación agrometeorológica Sayago. Esta estación agrometeorológica está ubicada en el sur del país, con influencia marítima del Río de la Plata, lo que provocaría que la amplitud térmica anual sea menor, y las temperaturas extremas muy bajas sean menos probable (Burgos 1963, FAO 2010).

Estos resultados permiten calcular probabilidades de ocurrencia de heladas asumiendo una distribución normal en gran parte del país, aunque no

en la totalidad; si las series contaran con más años de datos se podría volver a hacer las pruebas para verificar el ajuste con una muestra más grande.

Para el cálculo de probabilidades asumiendo una distribución normal se consideró la situación como un caso de probabilidad condicionada. En futuros estudios es posible explorar otras soluciones de cálculo para esta distribución teórica y otros casos de probabilidad.

El cálculo de probabilidades descrito en este trabajo puede ser utilizado para determinar la fecha hasta o a partir de la cual existe cierta probabilidad de ocurrencia de heladas, de tal modo que puede ser útil en la gestión de las actividades agronómicas, por ejemplo en la determinación de fechas de plantación.

Otro alcance de esta metodología es la posibilidad de calcular qué probabilidad de ocurrencia de helada existe en determinada fecha, o que rango de probabilidades de ocurrencia existe en determinado período.

5.6. ANÁLISIS DESCRIPTIVO DEL EVENTO JUNIO 2012

El evento extremo de heladas que sucedió en junio de 2012, se caracterizó por la invasión de una masa de aire con baja temperatura, sin hacer énfasis en el nivel térmico (menor, igual o superior a 0 °C). Se subraya que esta situación generó un enfriamiento generalizado de la región, seguido de un sistema atmosférico de alta presión que generó un enfriamiento aun mayor del aire, lo cual resultó en temperaturas bajas del aire sobre el territorio uruguayo.¹

A todo este enfriamiento generado por la invasión de una masa de aire frío, se le sumó la pérdida de calor por radiación, que se da comúnmente durante las noches, sobre todo despejadas. Esto generó que se provocaran varias noches seguidas con heladas en distintas zonas del país, mientras la masa de aire frío se mantuvo en la región. Las bajas temperaturas mínimas que se sucedieron día tras día, ocurrieron debido a la pérdida de energía por radiación favorecida por las condiciones meteorológicas. Estos aspectos combinados en la generación del evento permiten definirlo como de carácter mixto.

Las heladas ocurridas en el evento 2012 se concentran entre los días 6 y 11 de junio. En cuanto a la fecha de ocurrencia del evento 2012, para la mayoría de los casos, ocurrió antes de la fecha media de ocurrencia de primera helada, y además, en todos los casos la fecha de ocurrencia de la primera helada del año 2012 se encuentra incluida en el evento 2012. Esto explica en

¹ Caffera, M. 2015. Com. personal.

parte el gran efecto dañino que tuvo este evento en las plantas, ya que, como se menciona en la revisión bibliográfica, cuanto más temprano sucede una helada en otoño mayor es la sensibilidad y vulnerabilidad de las plantas al daño por helada. Este evento coincidió también con la primera exposición que tuvieron las plantas a las bajas temperaturas (Burgos 1963, Balmelli 1993, FAO 2010).

Como se puede observar en los Cuadros No. 54, 55 y 56, la cantidad de días seguidos con heladas durante el evento 2012 (Hds2012) fue menor en las estaciones del sur del país, lo cual puede deberse también a que, como es una zona cercana al mar, presenta menor amplitud térmica y menores probabilidades de heladas, debido al efecto regulador de la temperatura del aire que tiene el mar, efecto citado por Burgos (1963), FAO (2010).

El invierno de 2011, que precedió al de 2012, se destaca por una notable cantidad de días con heladas registrados. Al evento de junio de 2012, le siguió un julio con un alto número de días con helada. Esta sucesión de inviernos (año 2011-2012) es un aspecto a considerar en ulteriores análisis vinculados al daño constatado en diferentes cubiertas vegetales. En particular durante el evento 2012 ocurrió daño sobre árboles de gran porte (plantaciones forestales y cítricas adultas) el cual pudo haber sido causado por un daño acumulativo. En el año 2012 también se reportaron daños importantes de plantaciones forestales de menos de un año (plantaciones de primavera de 2011).

En un gran número de estaciones meteorológicas, sobre todo las ubicadas hacia el noreste, norte, litoral oeste y centro (Mercedes, Paysandú, Paso de los Toros, INIA Treinta y Tres y Artigas), fue registrado en el año 2012, el mayor número de días seguidos con heladas por debajo del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, desde 1981 al 2013. Este aspecto revela la singularidad del evento y por lo tanto de los daños observados en las plantas. En los caso de las estaciones Melo y Salto la mayor cantidad de días seguidos con temperaturas iguales o menores a $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ sucedió durante el 2011.

Por último se analizaron las condiciones térmicas previas al evento, para lo cual se graficó la temperatura media desde abril a julio de los años 2012 y 2011 y en particular se procedió en aquellas estaciones del país que se asocian con la producción forestal y cítrica.

Desde el punto de vista fenológico, las condiciones térmicas previas a un evento de helada determinan el grado de endurecimiento que tiene las plantas al momento de enfrentar el evento. Si la tensión térmica es mayor, entonces el evento es potencialmente más peligroso. En el caso que previo a la helada existen temperaturas activas (mayores a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) que estimulan la actividad vegetativa, los vegetales presentan brotes jóvenes y más sensibles a

las heladas al momento del evento (Burgos 1963, Balmelli 1993, FAO 2010). En este estudio se identificó un período previo e inmediato a este evento, con temperaturas relativamente altas lo que permite inferir que las plantas no tuvieron oportunidad de generar un grado de endurecimiento tal que les permitiera disminuir la sensibilidad a las bajas temperaturas y por ende aumentar la tolerancia frente a este evento.

Por otro lado cuando la tensión térmica anual es menor, es decir se da una disminución más gradual de las temperaturas, esto permite a las plantas aclimatarse y endurecerse, lo que las hace más resistentes a las bajas temperaturas al momento de enfrentarlas (Burgos, 1963).

En las gráficas de la temperatura mínima previa al evento 2012, se puede observar que durante el mes de mayo de 2012, las temperaturas mínimas diarias se encontraban con valores superiores a 10 °C, es decir que eran temperaturas activas, por lo que posiblemente las plantas se encontraran más activas y por lo tanto presentarían mayor vulnerabilidad al momento del evento (principios de junio 2012).

Previo al evento de junio 2012, se pudo observar que efectivamente existieron temperaturas medias diarias y mínimas diarias relativamente altas; es decir que hubo una gran tensión térmica durante el otoño 2012, lo cual pudo haber generado que las plantas se encontraran con mayor sensibilidad al momento que ocurrieron las temperaturas hasta umbrales muy bajos. Esta situación junto a la sucesión de días con niveles de helada, observado en la mayoría de las estaciones meteorológicas, explica la magnitud de los daños que produjo este evento.

6. CONCLUSIONES

- Un régimen agroclimático de heladas elaborado con varios umbrales térmicos es una herramienta que puede ser útil para tomar decisiones agronómicas en diferentes situaciones en cuanto a la altura y umbrales de daño de los cultivos, sobre todo en lugares donde las heladas más comunes que ocurren, tienen un componente de pérdida de energía por radiación relevante.
- De las estaciones meteorológicas analizadas en este trabajo, el mayor porcentaje de años con heladas corresponde a las ubicadas hacia el noreste, litoral oeste y centro del Uruguay. Hacia el norte la incidencia es menor y en el sur se registra el menor porcentaje.
- Las estaciones meteorológicas con mayor duración del período medio con heladas son las ubicadas hacia el noreste, litoral oeste y centro del país; hacia el norte el período es un poco menor y los menores valores a nivel nacional se dan en el sur.
- Para las zonas más continentales del país se presentan las primeras y últimas heladas más peligrosas, ya que es más probable que encuentren a las plantas menos endurecidas y por lo tanto menos resistentes al frío.
- Las fechas de ocurrencia de heladas más tempranas y más tardías fueron las obtenidas en las estaciones meteorológicas ubicadas hacia el noreste, litoral oeste y centro; hacia el norte y en el sur, la ocurrencia de primeras heladas es más tarde y las últimas son más tempranas.
- Para una gran mayoría de muestras de fechas de primeras y últimas heladas el ajuste a un modelo normal aproximado es positivo, por lo que es posible realizar cálculo de probabilidad de ocurrencia de heladas asumiendo una distribución normal en casi todo el país como un método alternativo al método empírico.
- El evento de heladas de junio 2012, que fue muy dañino para la producción forestal y citrícola del país, se describe como un evento particular en cuanto a la cantidad de días seguidos con temperaturas por debajo de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, y por las condiciones meteorológicas previas, que en conjunto fueron determinantes en la magnitud del daño.

7. RESUMEN

Las heladas son una adversidad climática que causa importantes daños en los cultivos, por lo tanto su estudio es significativo para la toma de decisiones en las actividades agrícolas. Las tendencias espaciales y temporales de evento heladas en el país, se pueden ilustrar a través del régimen agroclimático de heladas, usando cuadros y mapas. Esta caracterización se realizó usando diferentes umbrales, teniendo en cuenta la diferencia que existe en la temperatura a diferentes alturas durante las noches con inversión térmica y teniendo en cuenta que existen variaciones en la altura de los cultivos y en sus umbrales de daño. En Uruguay las estaciones con mayor porcentaje de años con heladas son las ubicadas al noreste, litoral oeste y centro; hacia el norte la incidencia es menor y en el sur se registra el menor porcentaje. Las estaciones con mayor período con heladas medio son las ubicadas al noreste, litoral oeste y centro; hacia el norte el período es menor y los menores valores a nivel nacional se dan en el sur. Las heladas primaverales y otoñales deben describirse de acuerdo a su fecha de ocurrencia y dispersión, y las heladas invernales de acuerdo a la intensidad. En Uruguay las heladas otoñales más tempranas y las primaverales más tardías, es decir las más peligrosas, ocurren en el noreste, litoral oeste y centro; hacia el norte la peligrosidad es un poco menor; y en el sur se dan las heladas otoñales y primaverales menos peligrosas. En cuanto a la peligrosidad de primeras y últimas heladas se calculan diferentes índices de peligrosidad de heladas, como el índice crikindinoscópico y el período de peligrosidad, resultando que para las zonas más continentales del país se presentan las primeras y últimas heladas más peligrosas, ya que es más probable que encuentren a las plantas menos endurecidas y por lo tanto menos resistentes al frío. La probabilidad de ocurrencia de heladas puede calcularse usando el método empírico o asumiendo una distribución normal, este último procedimiento se pudo realizar luego de que se probara la distribución normal aproximada de las muestras. El evento de heladas del 2012 fue devastador, sobre todo en la producción forestal, ya que afectó a plantaciones de *Eucalyptus spp.*. Por esto se realizó una descripción del evento y se demostró su singularidad, en virtud de lo cual se puede decir que se trató de una situación extrema con bajo período de retorno.

Palabras clave: Helada; Régimen agroclimático de heladas; Umbrales de daño por heladas en *Eucalyptus spp.*; Peligrosidad de primeras y últimas heladas; Índice crikindinoscópico; Cálculo de probabilidad de ocurrencia de heladas; Evento de heladas junio 2012.

8. SUMMARY

Frost is a climatic adversity which causes significant damage to crops, so their study is meaningful for decision-making in agricultural activities. Spatial and temporal trends of frost phenomenon in the country, can be illustrated through the agro-climatic frost regime, using charts and maps. This characterization was done using several thresholds, considering the difference in temperature at different heights at night with temperature inversion and knowing that there are variations in the heights and damage thresholds in different crops. In Uruguay, the stations with the highest percentage of frosts per year are in the northeast, west littoral and in the center of the country; in the north the incidence is lower, and in the south the lowest percentage is recorded. Stations with the highest average period with frost are in the northeast, west littoral and in the center of the country; in the north the average period is shorter and the lower values in the country are given in the south. The spring and autumn frosts should be described according to their date of occurrence and spread, and winter frosts according to intensity. In Uruguay the first fall and last spring frost, which are the most dangerous, are recorded in the northeast, west littoral and in the center of the country; in the north dangerousness is a little lower; and in the south the least dangerous autumn and spring frosts occur. As for the dangerousness of early and late frosts different measurement methods are used to calculate the impact of frost, such as the crikindinoscopic index and the period of dangerousness, resulting that the most continental zones of the country presented the first and last most dangerous frost, because it is more likely to find plants in a condition of increased sensitivity to cold and lower cold hardiness. The probability of occurrence of frost can be calculated using the empirical method or assuming a normal distribution, the latter procedure was performed after the approximate normal distribution of samples was tested. The event of frost in 2012 was devastating, particularly in forest production as affected plantations of *Eucalyptus spp.*. Because of this a description of the event was realized and its singularity was demonstrated, so you could say that it was an extreme situation with low return period.

Key words: Frost; Agroclimatic frost regime; Damage thresholds in *Eucalyptus spp.*; Danger of early and late frosts; Crikindinoscopic index; Calculation of probability of occurrence of frost; Frost event in June 2012.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar, E.; Sigró, J.; Brunet, M. 2010. RCLIMDEX con funcionalidades extras de control de calidad; manual de uso, versión 1.0. (en línea). Tarragona, España, s.e. 12 p. Consultado mar. 2015. Disponible en http://www.c3.urv.cat/data/manual/Manual_rclimdex_extraQC.r.pdf
2. _____. 2013. Aproximación a la homogeneización de una red regional de series climáticas a resolución diaria. CRC-SAS. Serie reporte técnico no. 3. 25 p.
3. Alarcón Velazco, C. E.; Trebejo Varillas, I. 2010. Atlas de heladas del Perú. (en línea). Lima, Perú, SENAMHI/FAO. 50 p. Consultado abr. 2015. Disponible en http://www.senamhi.gob.pe/main_down.php?ub=est&id=atlasHeladas
4. Balmelli, G. 1993. Daño por heladas en Eucalyptus; evaluación de daño en especies y orígenes en el primer invierno. Montevideo, INIA. 32 p. (Serie Técnica no. 40).
5. Boshell, J. F.; Chiara, J. P. 1982. Regionalización agroclimática de la República Oriental del Uruguay. MDN. DNM. Nota técnica no. 50. 28 p.
6. Burgos, J. J. 1963. Las heladas en la Argentina. Buenos Aires, INTA. 388 p.
7. Castaño, J. P.; Giménez, A.; Ceroni, M.; Furest, J; Aunchayna, R. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay; 1980-2009. Montevideo, INIA. 40 p. (Serie Técnica no. 193).
8. CIIFEN (Centro Internacional Para la Investigación del Fenómeno de El Niño, CAN). 2004. RClimDex (1.0); manual de usuario. Ontario. 22 p.
9. Corsi, W.; Genta, H. 1992. Heladas en el área hortifrutícola de Salto. Montevideo, INIA. 30 p. (Serie Técnica no. 22).
10. Cruz, G.; Munka, C.; Pedocchi, R. 2000. Caracterización agroclimática de la región litoral centro oeste de la República Oriental del Uruguay. Agrociencia (Montevideo). 4(1): 87-92.

11. de Mello, S. 2013. Estudio climatológico y regionalización de heladas meteorológicas en Uruguay. Tesis Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera. Montevideo, Uruguay. Facultad de Ciencias. 84 p.
12. EMBRAPA. 1986. Zoneamiento ecológico para plantíos florestais no Estado do Paraná. Curitiba, BR, EMBRAPA-CNPQ-PNPF. 89 p.
13. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 1981. El eucalipto en la repoblación forestal. (en línea). Roma. 790 p. (Colección FAO Montes no. 11). Consultado may. 2015. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-ac459s.pdf>
14. _____. 2010. Protección contra las heladas; fundamentos, práctica y economía. (en línea). Roma. v. 1, 241 p. Consultado abr. 2014. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/012/y7223s/y7223s.pdf>
15. Gallino, J. P.; Fernández, M.; Tapias, R.; Alcuña, M. M.; Cañas, I. 2007. Aclimatación al frío en diferentes clones de *Eucalyptus globulus* Labill durante el régimen natural de endurecimiento. Boletín del CIDEU. no. 4: 77-83.
16. García, M. S.; Leva, P.; Maio, S.; Tófoli, G.; Gariglio, N. 2014. Cuantificación del riesgo de daños ocasionados por heladas tardías en Rafaela (Santa Fe, Argentina). Agrociencia (Montevideo). 18(2): 28-32.
17. INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, AR). 2012. Las heladas del 7, 8 y 9 de junio en la costa del río Uruguay y sus efectos sobre las plantaciones de eucalipto. Concordia, Entre Ríos. 17 p.
18. Jornada de Divulgación sobre Daños por Heladas en Citricultura (2012, Salto Grande, UY). 2012. Análisis y recomendaciones para el manejo agronómico de montes afectados. (en línea). Montevideo, INIA. 16 p. (Actividades de Difusión no. 685). Consultado oct. 2015. Disponible en <http://http://www.inia.uy/Publicaciones/Paginas/publicacion-2572.aspx>
19. Meyer, P. L. 1983. Probabilidad y aplicaciones estadísticas. Washington, D.C., Addison-Wesley. 372 p.
20. MGAP. DGF. (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección General Forestal, UY). 2014. Estadísticas y mercado. (en línea). Montevideo. 1 p. Consultado abr. 2014. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,dgf,dgf-estadisticas-y-mercado,O,es,0>

21. OMM (Organización Meteorológica Mundial, CH). 1987. Glosario de términos usados en agrometeorología. (en línea). Ginebra. 213 p. (Informe CAgM no. 20). Consultado abr. 2015. Disponible en <http://www.wamis.org/agm/pubs/CAGMRep/CAGM20S.pdf>
22. Orecchia Buró, H. 1961. El régimen agroclimático de heladas en la República Oriental del Uruguay. Montevideo, Instituto de Recursos Naturales. 12 p.
23. Pitz Floriani, M. M.; Steffens, C. A.; Miler Chaves, D.; Vidal Talamini do Amarante, C.; Pikart, T. G.; Dos Santos Ribeiro, M. 2013. Relação entre concentrações foliares de carboidratos solúveis totais e tolerância ao frio em diferentes espécies de *Eucalyptus spp.* *Ciência Florestal* (Santa Maria). 23(1): 165-174.
24. Rosenberg, N. J.; Blad, B. L.; Verma, S. B. 1983. Microclimate; the biological environment. 2nd. ed. New York, US, Wiley and Sons. 495 p.
25. Sentelhas, P. C.; Ortolani, A. A.; Macedo Pezzopane J. R. 1995. Estimativa da temperatura mínima de relva e da diferença de temperatura entre o abrigo e a relva em noites de geada. *Bragantia* (Campinas). 52(4): 437-445.
26. Skansi, M. D. L. M.; Brunet, M.; Sigró, J.; Aguilar, E.; Arevalo Groening, J. A.; Bentancur, O. J.; Castellón Geier, Y. R.; Correa Amaya, R. L.; Jácome, H.; Malheiros Ramos, A.; Oria Rojas, C.; Pasten, A. M.; Sallons Mitro, S.; Villaroel Jiménez, C.; Martínez, R.; Alexander, L. W.; Jones, P. D. 2013. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. (en línea). *Global and Planetary Change*. 100:295-307. Consultado may. 2015. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818112002172>
27. Toledo, S. rev. 2013. Guía para la presentación de trabajos finales. (en línea). Montevideo, Facultad de Agronomía. Departamento de Documentación y Biblioteca. 29 p. Consultado may. 2015. Disponible en <http://www.biblioteca.fagro.edu.uy/files/Guia.pdf>
28. UdelaR. FA (Universidad de la República. Facultad de Agronomía, UY). 1986. Atlas climatológico del Uruguay. Montevideo. 57 p.
29. _____. _____. 2010. Naturaleza y principales características de las heladas. Montevideo. 10 p.
30. _____. _____. 2014. Curso de agrometeorología, guía de prácticos. Montevideo. 138 p.

31. Villalpando, J. F. 1985. Metodología de investigación en agrometeorología. Zapopan, México, INIA/SARH. 183 p.

9. ANEXOS

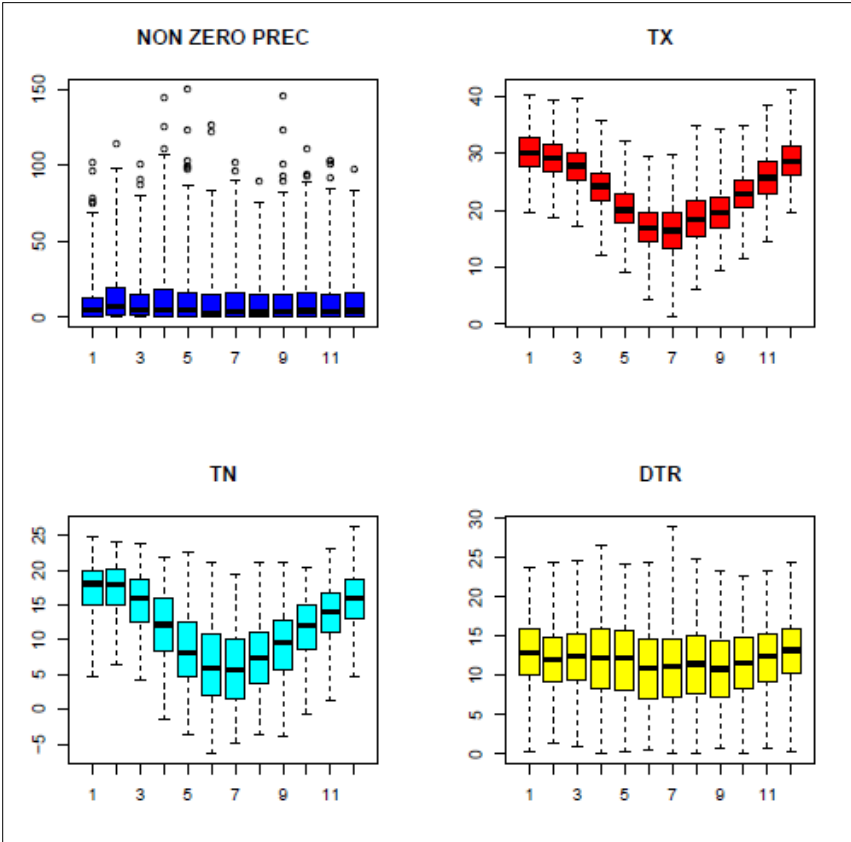
Anexo No. 1

Cuadro No. 1. Archivo Melo_tepstdQC.csv de rutina QC

| year | month | day | tmaxlow | tmax | tmaxup | tminlow | tmin | tminup | dtrlow | dtr | dtrup |
|------|-------|-----|---------|------|--------|---------|------|--------|--------|------|-------|
| 1982 | 1 | 23 | 19.71 | 28.2 | 40.86 | 7.81 | 6.6 | 26.57 | 0.46 | 21.6 | 25.74 |
| 1986 | 8 | 9 | 7.63 | 26.6 | 26.26 | -7.61 | 14.8 | 21.94 | -5.77 | 11.8 | 25.37 |
| 1988 | 7 | 30 | 5.46 | 28.2 | 28.04 | -10.74 | 13.2 | 22.43 | -6.41 | 15 | 28.2 |
| 1989 | 4 | 9 | 16.51 | 35.8 | 35.48 | -3.03 | 20.5 | 27.87 | 0.69 | 15.3 | 26.45 |
| 1991 | 2 | 16 | 20.89 | 27.8 | 37.61 | 6.89 | 6.8 | 27.6 | 0.34 | 21 | 23.67 |
| 1991 | 2 | 23 | 16.88 | 28 | 40.81 | 7.83 | 7.4 | 26.92 | -1.34 | 20.6 | 24.28 |
| 1992 | 10 | 28 | 12.04 | 11.6 | 36.34 | -2.65 | 1.6 | 26.64 | 0.13 | 10 | 24.75 |
| 1992 | 12 | 31 | 19.93 | 20.8 | 40.09 | 8.63 | 19.6 | 25.53 | 1.67 | 1.2 | 23.75 |
| 1994 | 1 | 11 | 18.76 | 29.2 | 43.28 | 9.19 | 9 | 26.13 | 1.94 | 20.2 | 24.77 |
| 1994 | 9 | 19 | 7.44 | 32.3 | 32.17 | -2.73 | 18.4 | 22.09 | -4.24 | 13.9 | 24.69 |
| 1994 | 9 | 23 | 8.35 | 34.4 | 32.8 | -3.3 | 15.7 | 23.71 | -3.54 | 18.7 | 24.06 |
| 1998 | 1 | 22 | 19.24 | 21 | 40.85 | 5.13 | 20.8 | 28.46 | 0.38 | 0.2 | 26.13 |
| 1999 | 4 | 16 | 12.52 | 12 | 33.17 | -4.79 | 7.2 | 28.69 | -5.81 | 4.8 | 27.58 |
| 1999 | 10 | 4 | 9.6 | 15.4 | 34.2 | -0.5 | -0.6 | 23.64 | -2.17 | 16 | 22.93 |
| 2003 | 10 | 18 | 13.51 | 31.8 | 31.25 | -1.54 | 15.8 | 21.5 | 2.96 | 16 | 22.06 |
| 2003 | 10 | 19 | 15.84 | 34.9 | 31.88 | 0.8 | 14.8 | 21.95 | 0.47 | 20.1 | 24.43 |
| 2004 | 4 | 15 | 13.02 | 35.8 | 35.72 | -3.36 | 19.5 | 28.54 | -5.67 | 16.3 | 29.23 |
| 2005 | 3 | 7 | 19.07 | 39.8 | 39.64 | 6.57 | 20.6 | 27.56 | -0.69 | 19.2 | 25.28 |
| 2006 | 7 | 22 | 4.15 | 27 | 26.73 | -10.21 | 11.2 | 21.65 | -6.71 | 15.8 | 26.04 |
| 2012 | 7 | 26 | 1.28 | 1.2 | 33.25 | -10.23 | -3.5 | 21.66 | -2.61 | 4.7 | 25.65 |

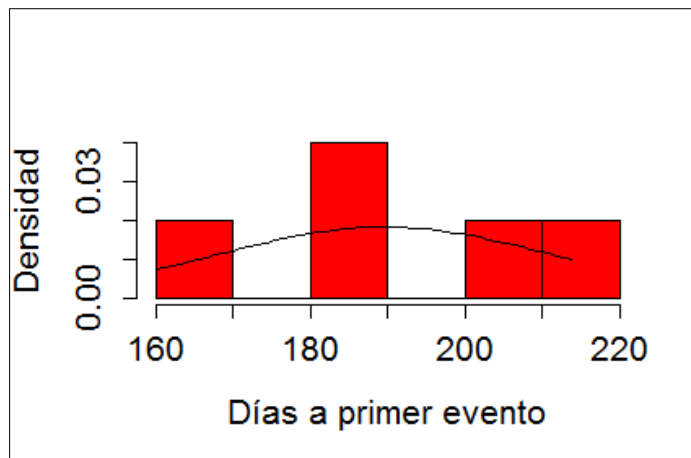
Anexo No. 2

Figura No. 1. Archivo Melo_boxes.pdf de rutina Extra_QC

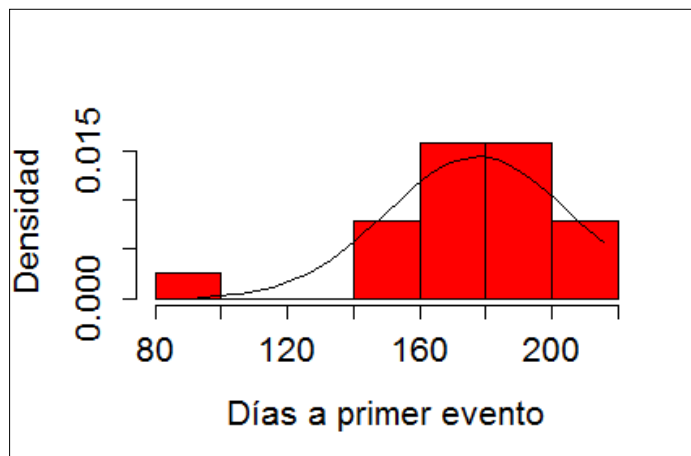


Anexo No. 3. Histogramas de densidad de muestras de fechas de ocurrencia de primeras heladas, para todos los umbrales (-4, -2, 0, 2 y 4 °C) y para cada una de las estaciones meteorológicas

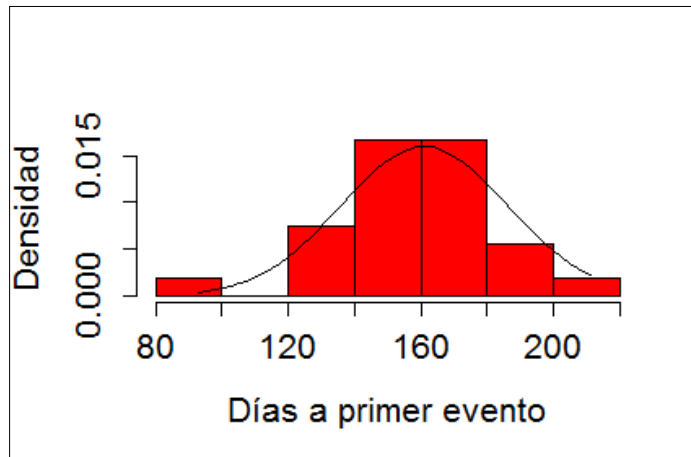
Gráfica No. 1. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral -4 °C, de la estación Artigas



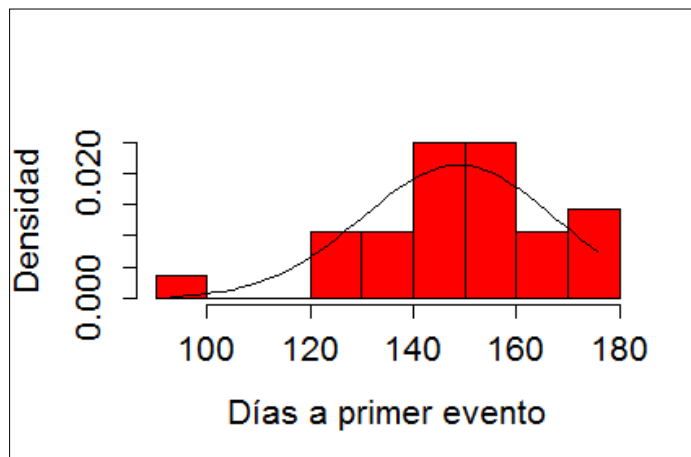
Gráfica No. 2. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral -2 °C, de la estación Artigas



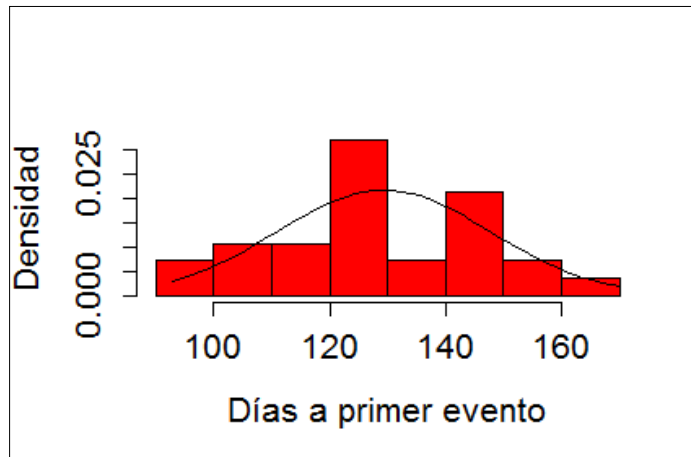
Gráfica No. 3. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación Artigas



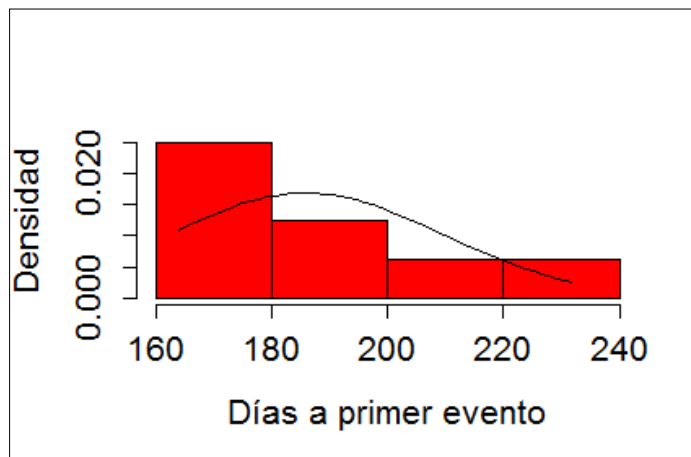
Gráfica No. 4. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Artigas



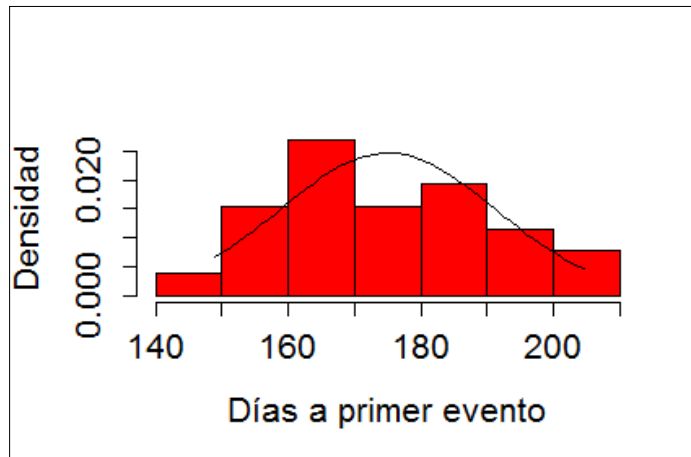
Gráfica No. 5. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Artigas



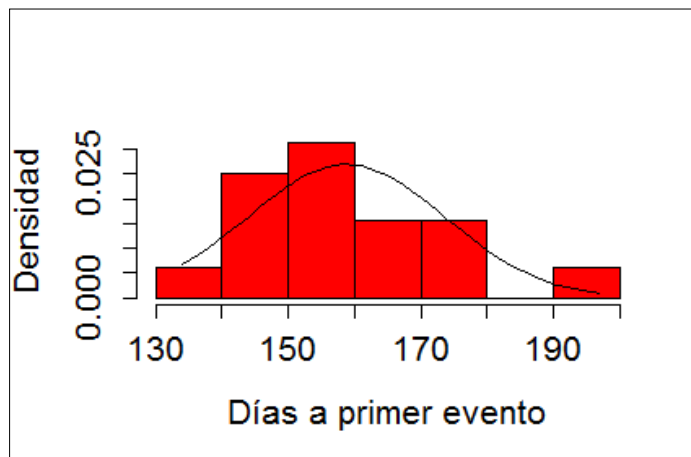
Gráfica No. 6. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral -2 °C, de la estación Carrasco



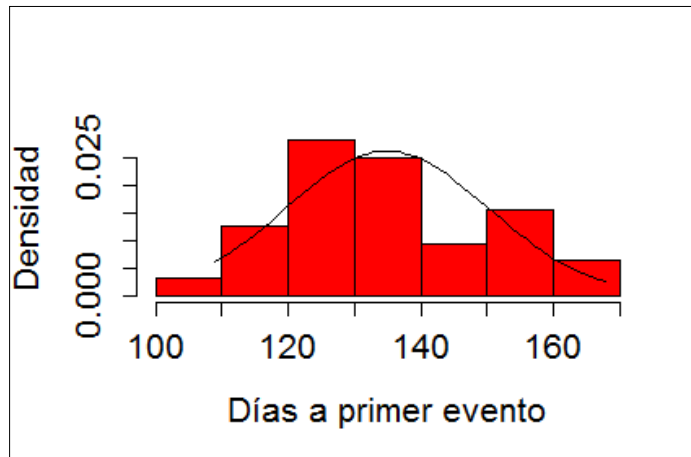
Gráfica No. 7. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación Carrasco



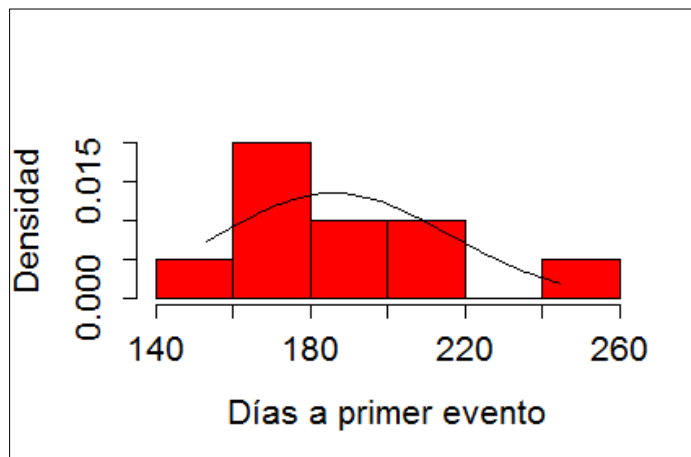
Gráfica No. 8. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Carrasco



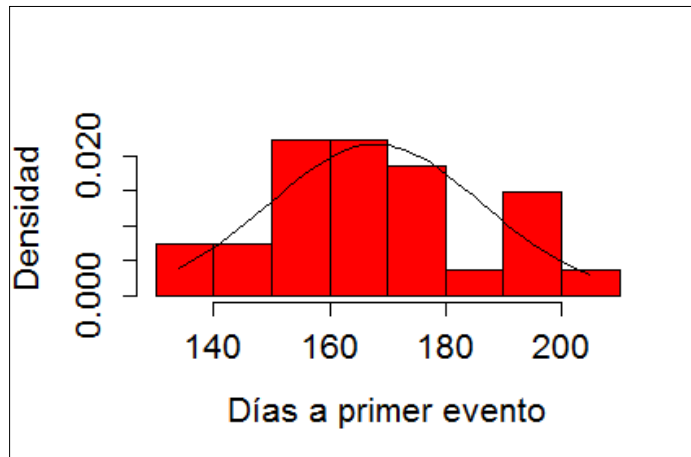
Gráfica No. 9. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Carrasco



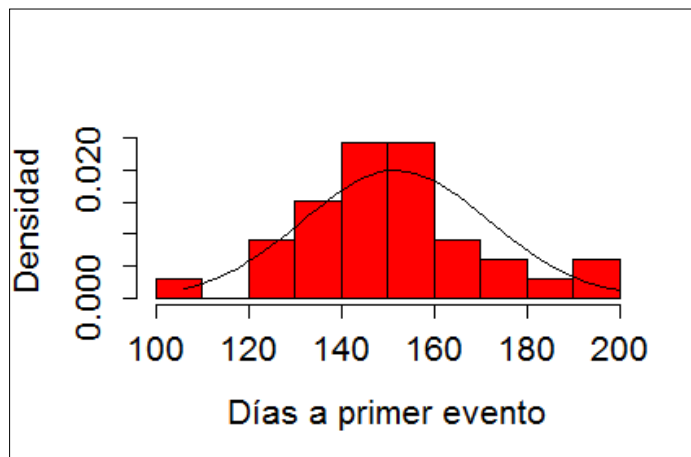
Gráfica No. 10. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral -4 °C, de la estación Melo



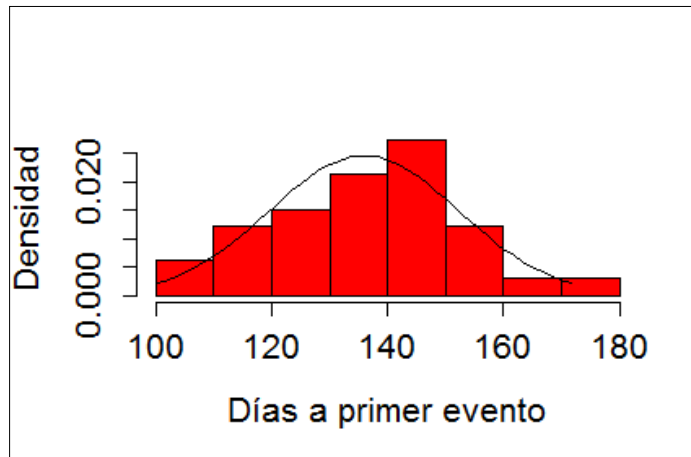
Gráfica No. 11. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Melo



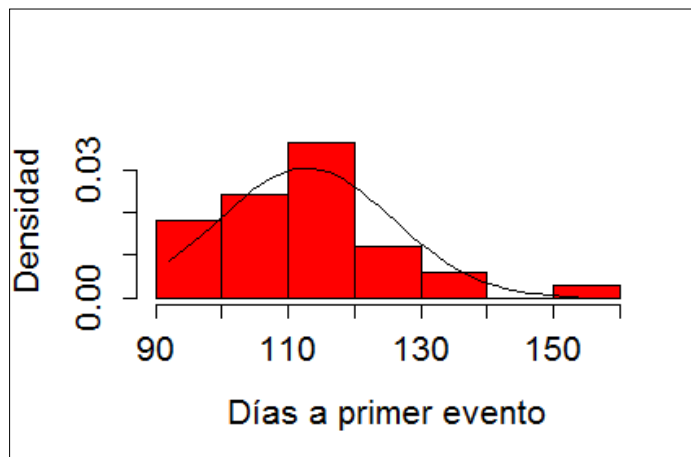
Gráfica No. 12. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Melo



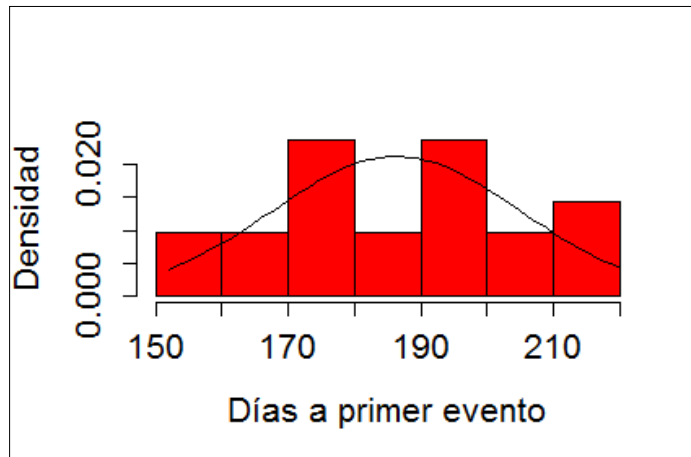
Gráfica No. 13. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Melo



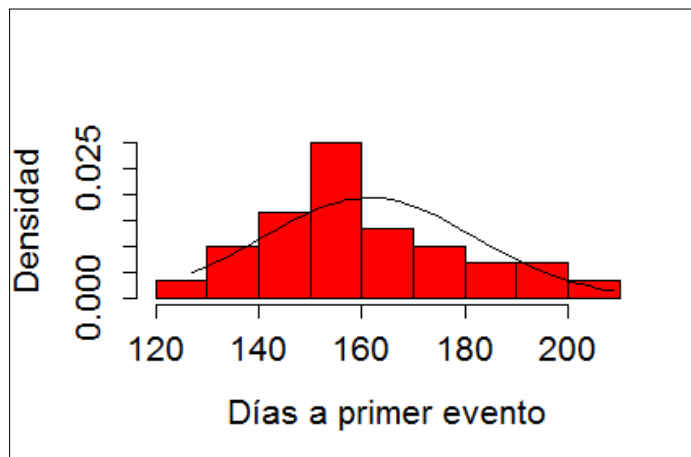
Gráfica No. 14. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Melo



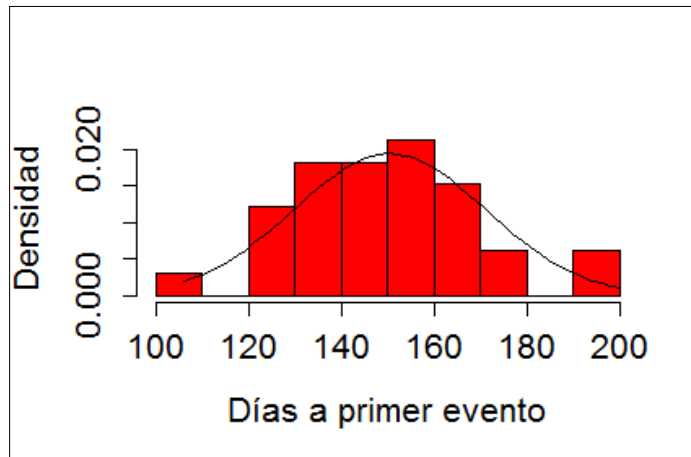
Gráfica No. 15. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Mercedes



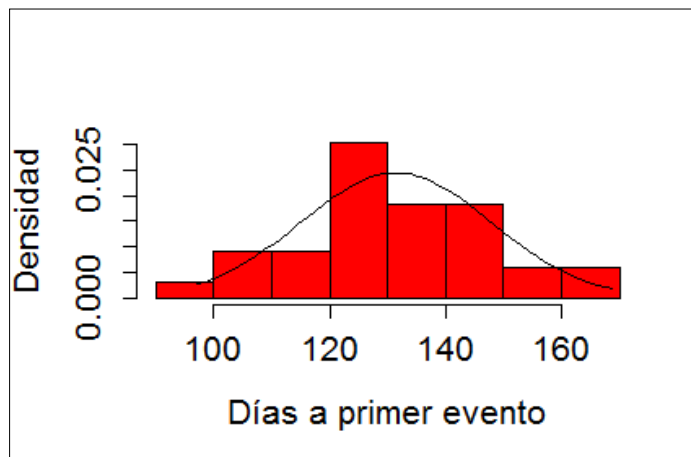
Gráfica No. 16. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Mercedes



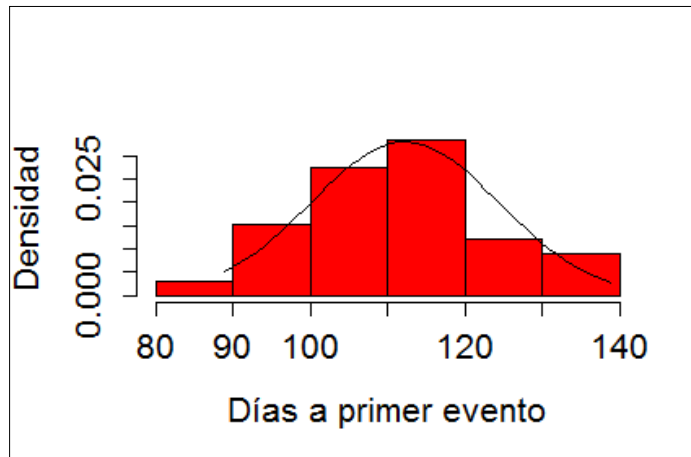
Gráfica No. 17. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación Mercedes



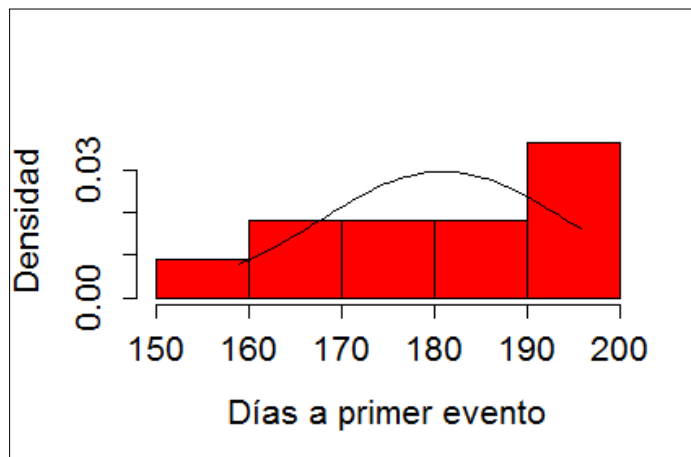
Gráfica No. 18. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Mercedes



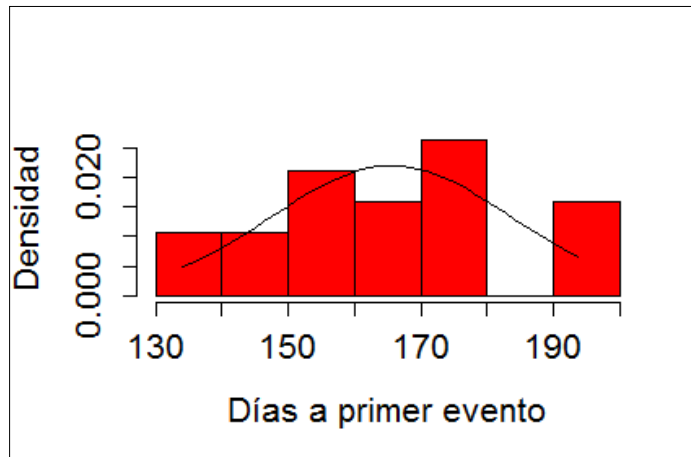
Gráfica No. 19. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Mercedes



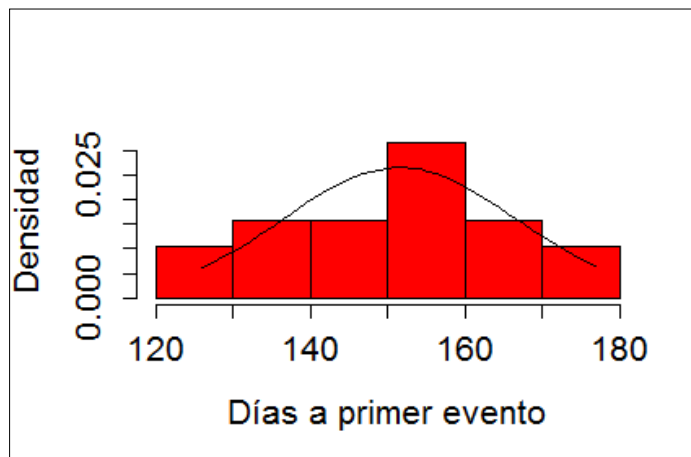
Gráfica No. 20. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral -2 °C, de la estación Paso de los Toros



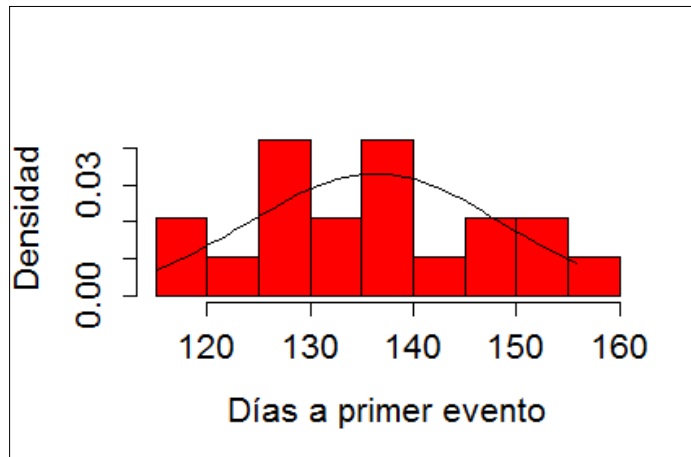
Gráfica No. 21. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación Paso de los Toros



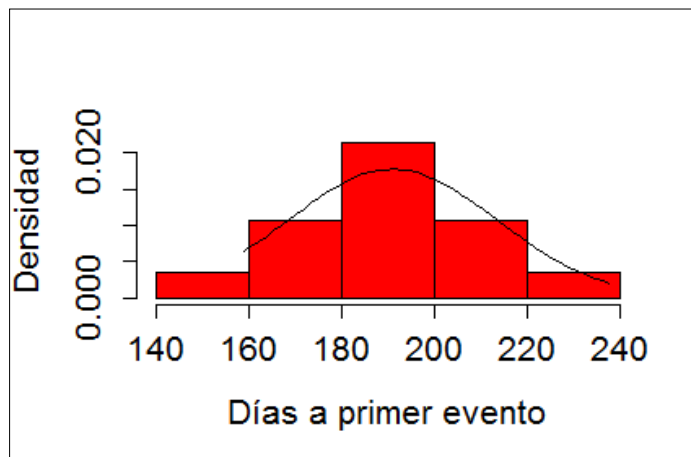
Gráfica No. 22. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Paso de los Toros



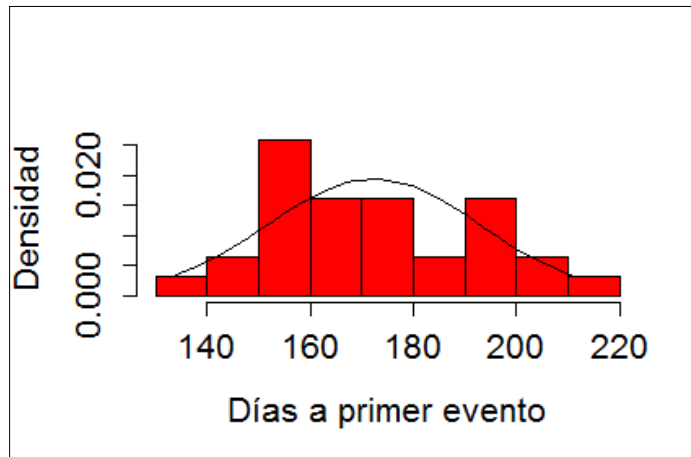
Gráfica No. 23. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Paso de los Toros



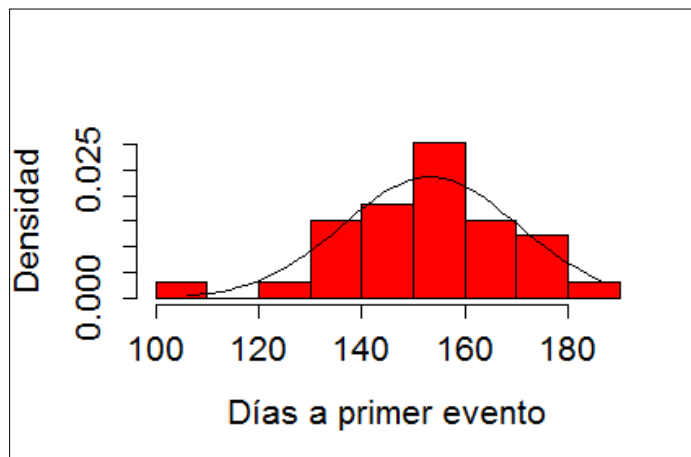
Gráfica No. 24. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral -2 °C, de la estación Paysandú



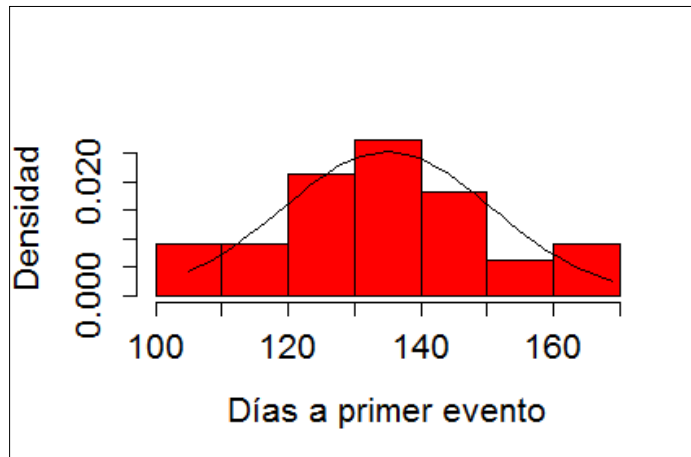
Gráfica No. 25. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación Paysandú



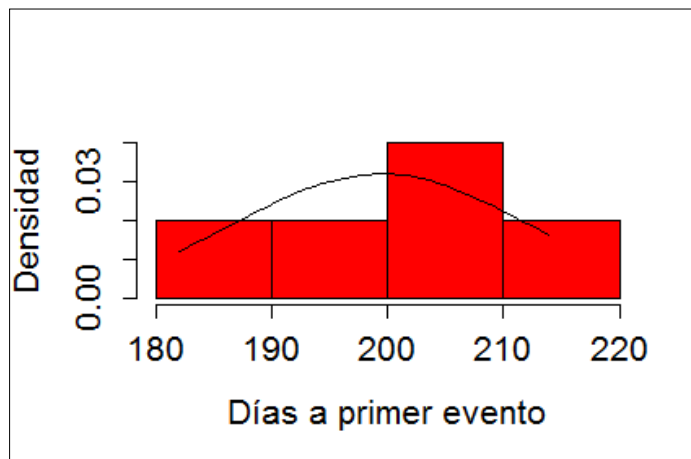
Gráfica No. 26. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Paysandú



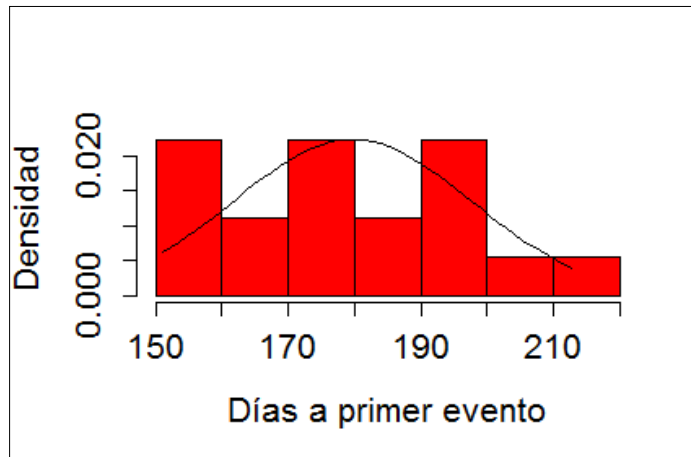
Gráfica No. 27. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Paysandú



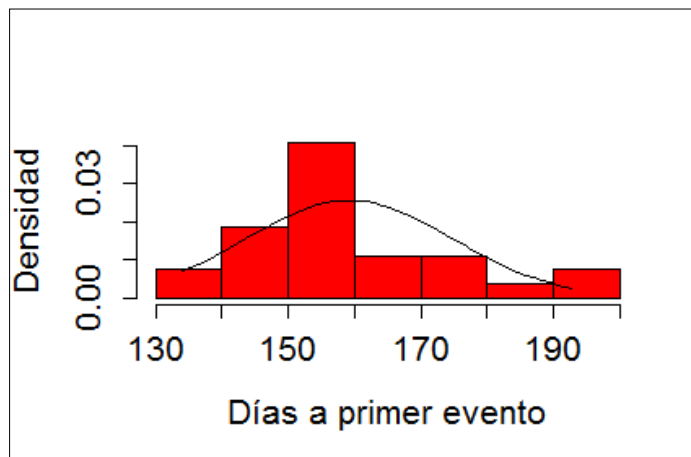
Gráfica No. 28. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral -2 °C, de la estación Rivera



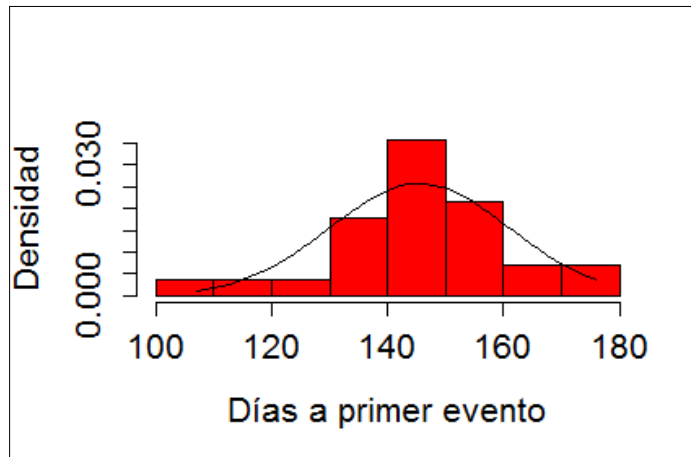
Gráfica No. 29. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación Rivera



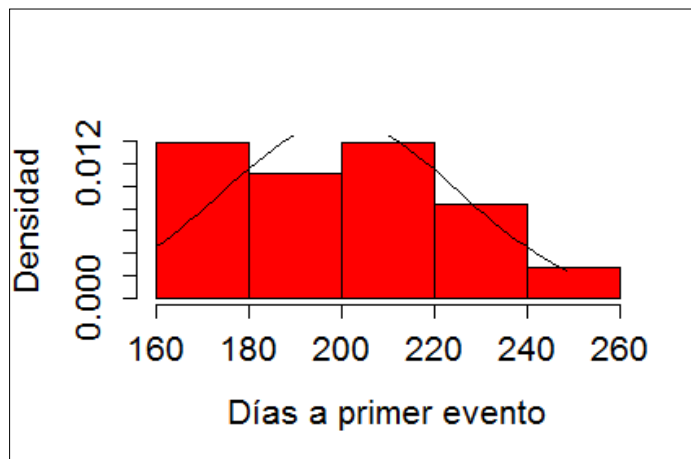
Gráfica No. 30. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Rivera



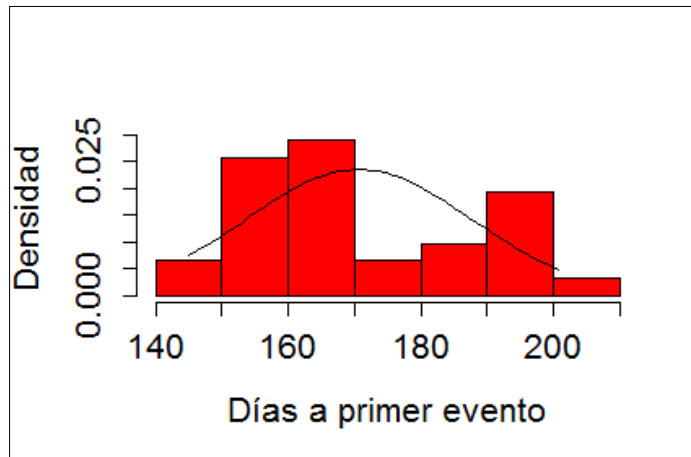
Gráfica No. 31. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Rivera



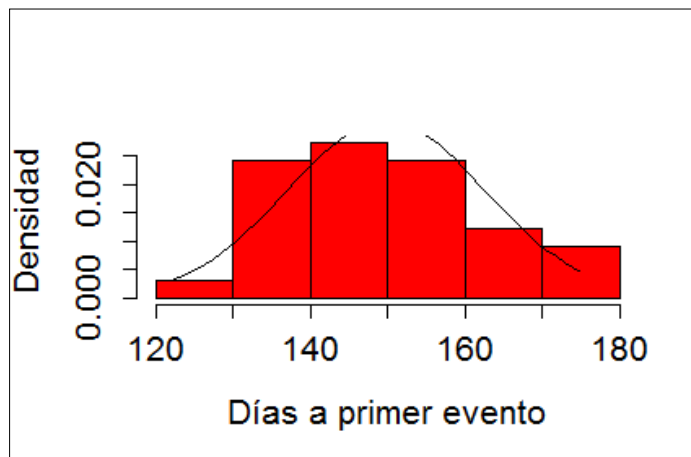
Gráfica No. 32. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral -2 °C, de la estación Rocha



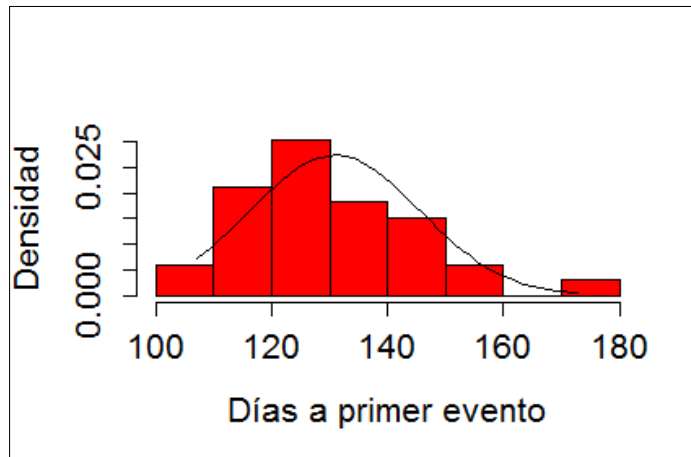
Gráfica No. 33. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación Rocha



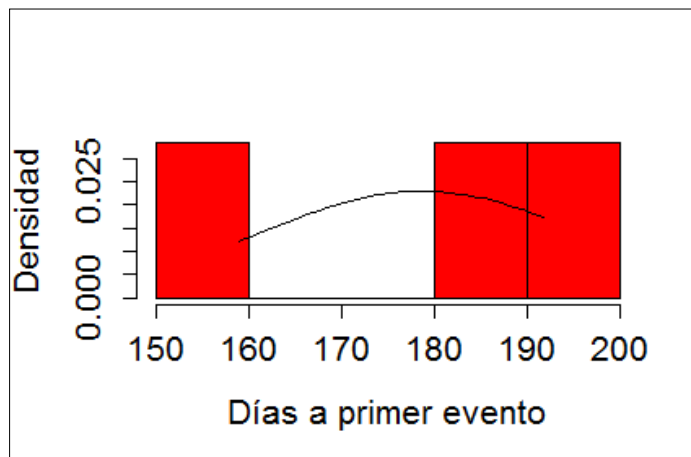
Gráfica No. 34. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Rocha



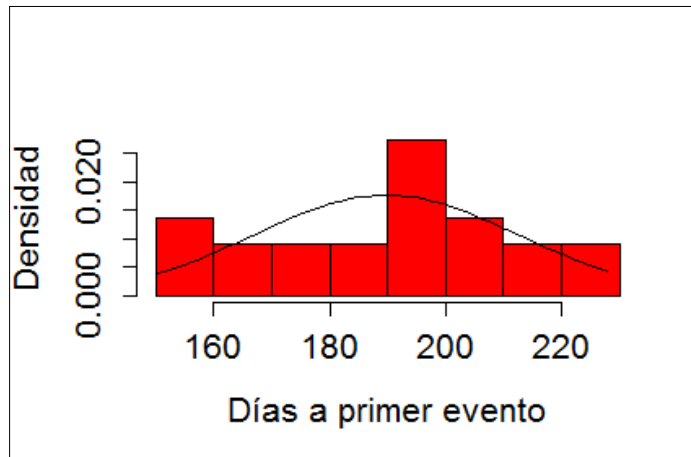
Gráfica No. 35. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Rocha



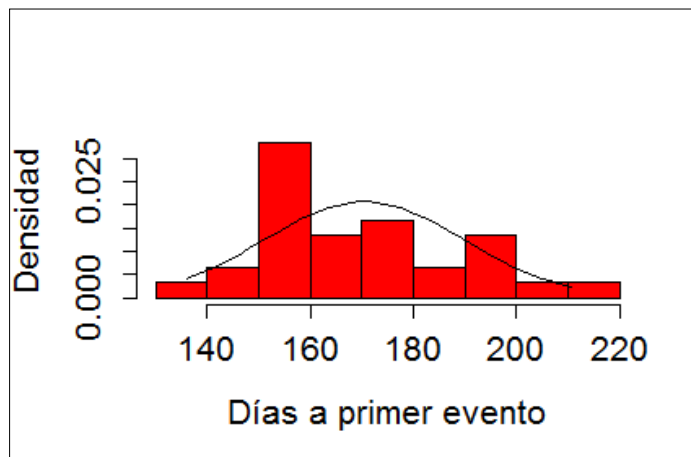
Gráfica No. 36. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral -4 °C, de la estación Salto



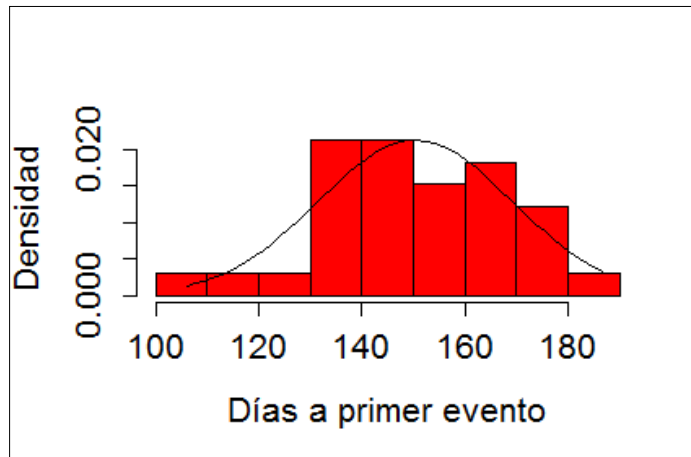
Gráfica No. 37. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Salto



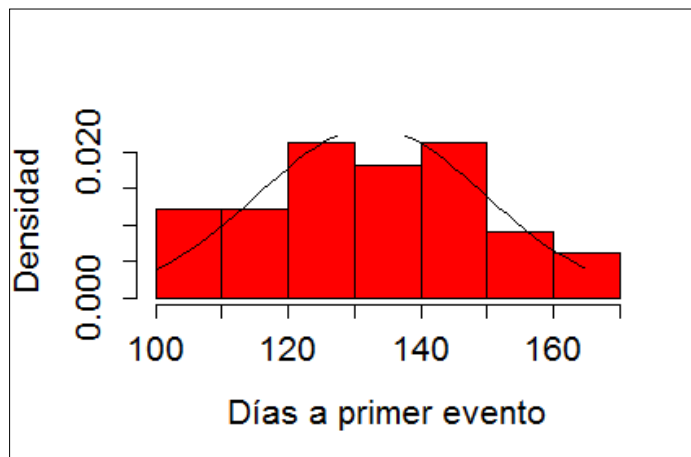
Gráfica No. 38. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Salto



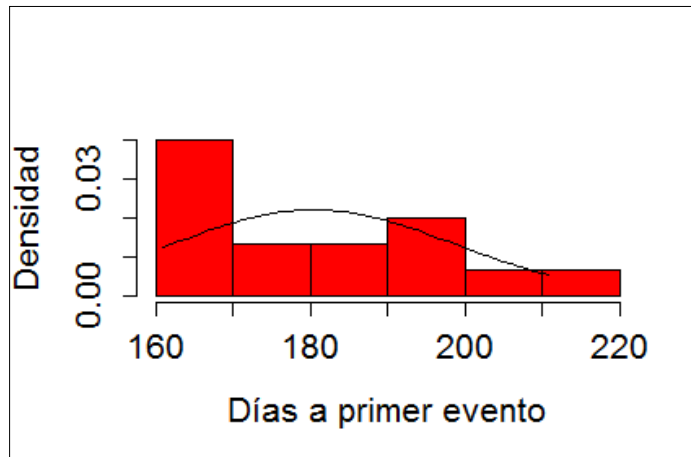
Gráfica No. 39. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Salto



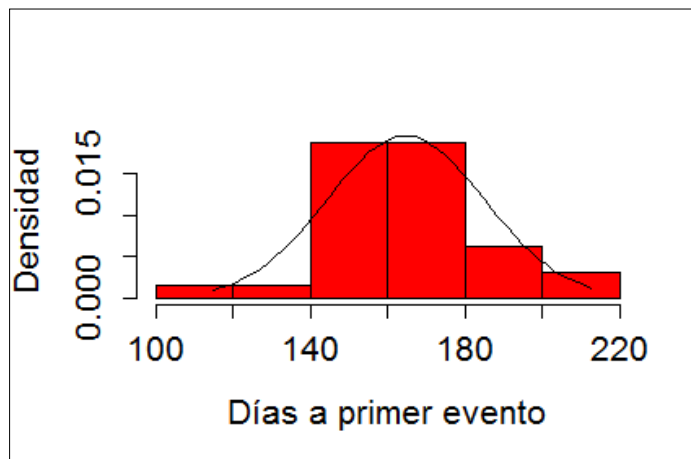
Gráfica No. 40. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Salto



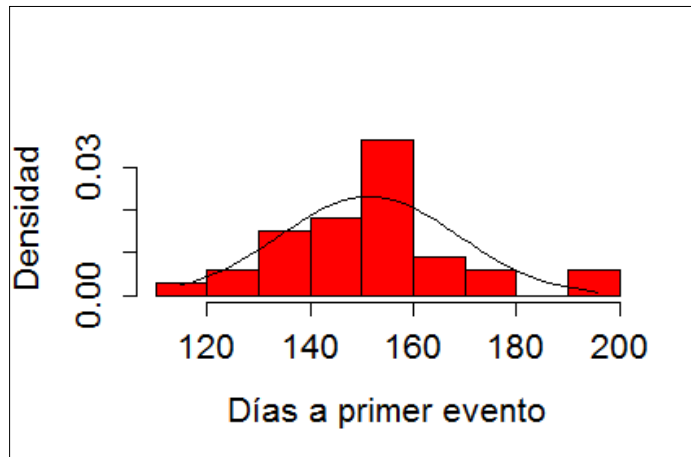
Gráfica No. 41. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación Sayago



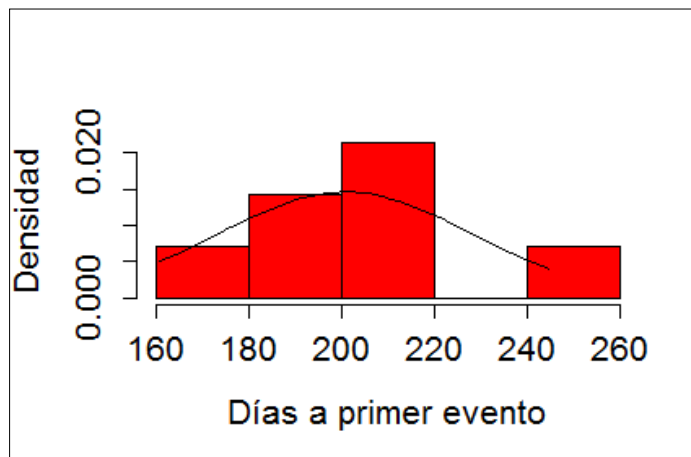
Gráfica No. 42. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Sayago



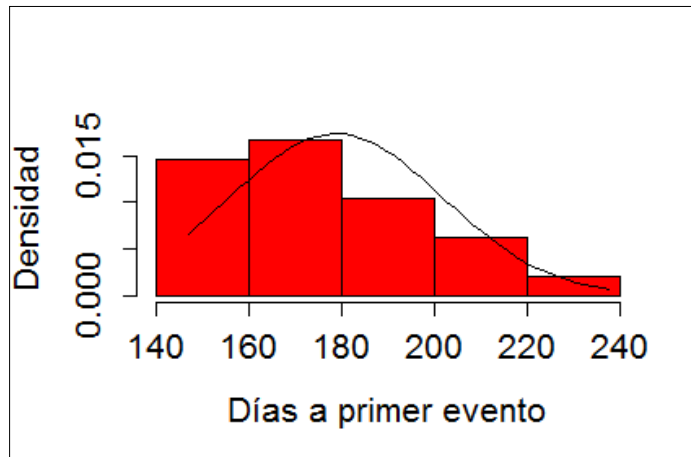
Gráfica No. 43. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Sayago



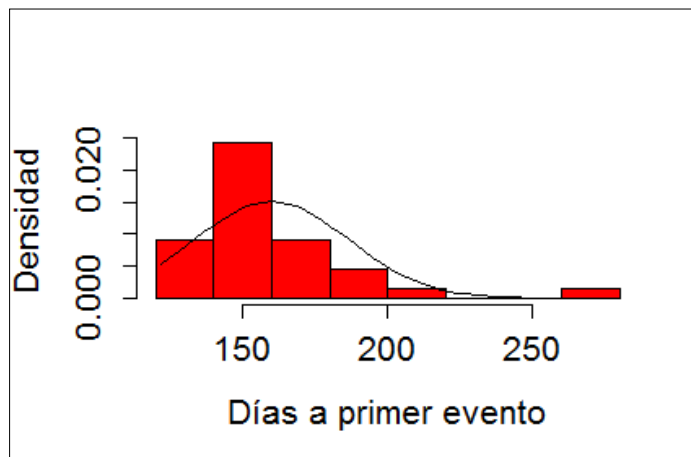
Gráfica No. 44. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral -4 °C, de la estación INIA Treinta y Tres



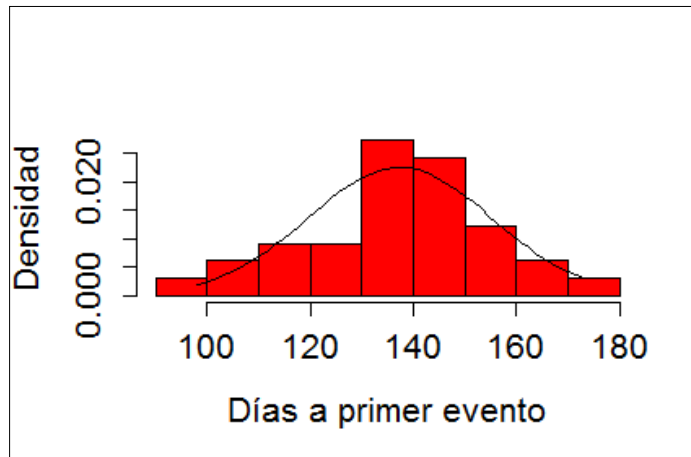
Gráfica No. 45. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación INIA Treinta y Tres



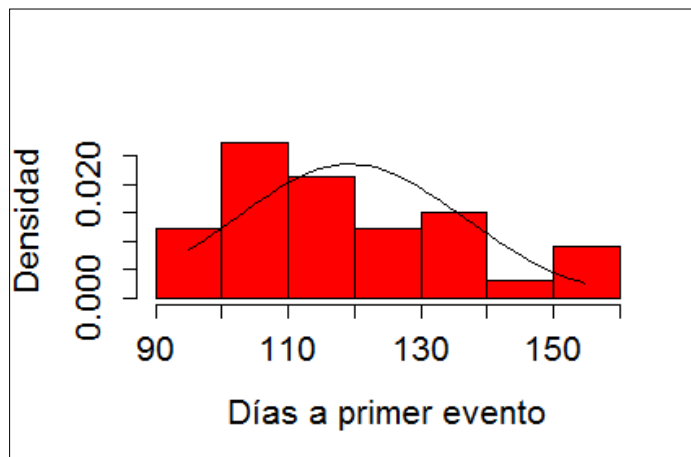
Gráfica No. 46. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación INIA Treinta y Tres



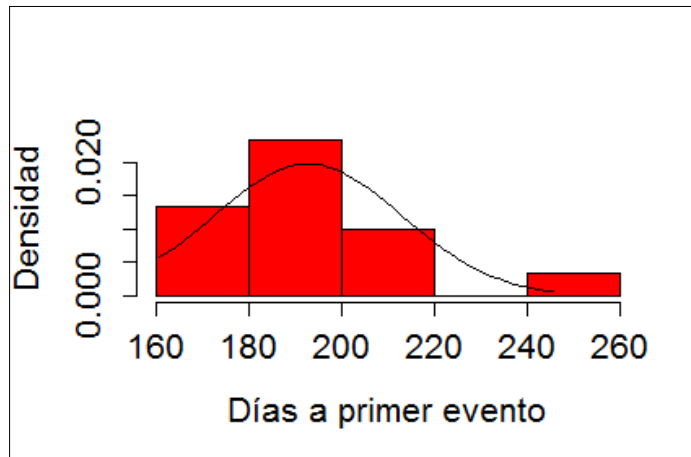
Gráfica No. 47. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación INIA Treinta y Tres



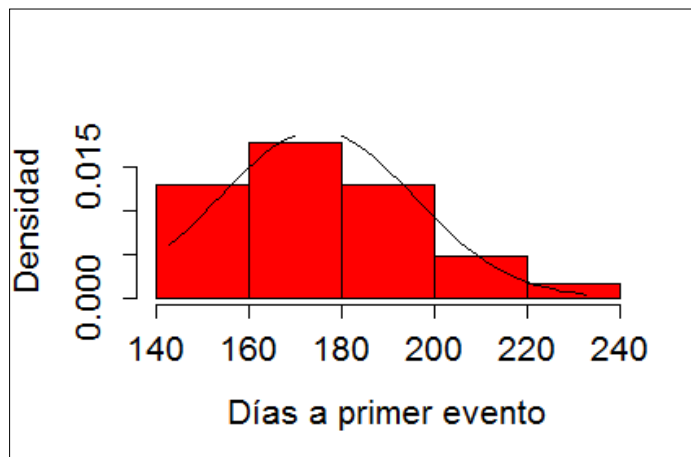
Gráfica No. 48. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación INIA Treinta y Tres



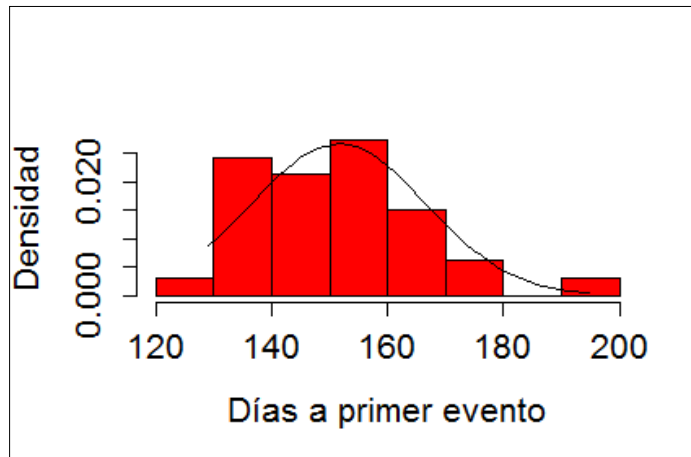
Gráfica No. 49. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación INIA Las Brujas



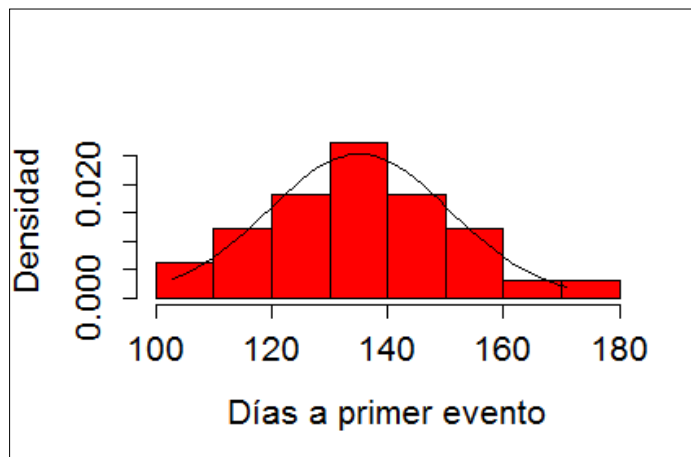
Gráfica No. 50. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación INIA Las Brujas



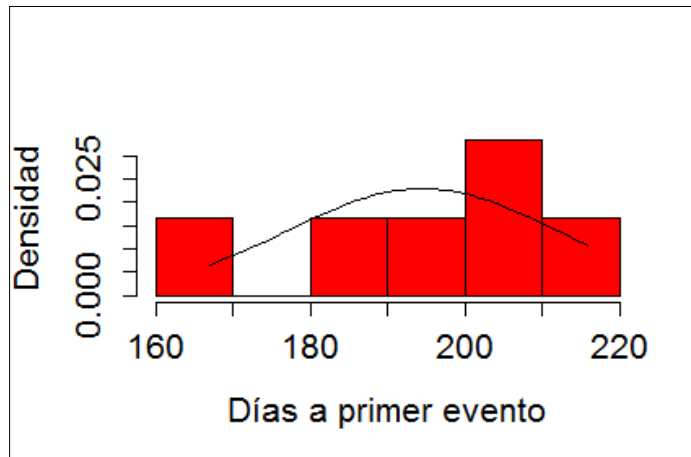
Gráfica No. 51. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación INIA Las Brujas



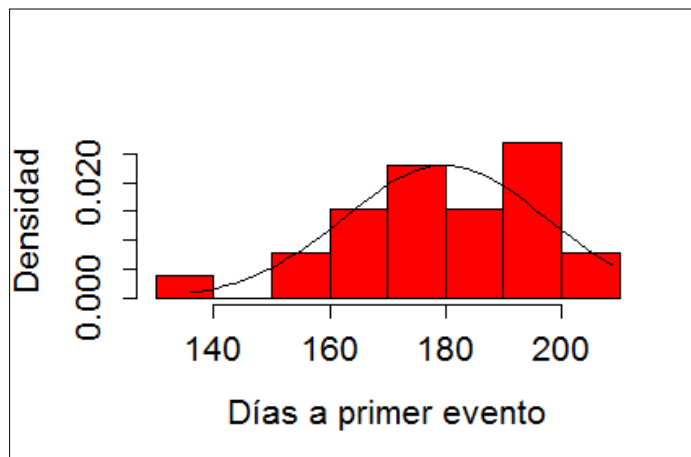
Gráfica No. 52. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación INIA Las Brujas



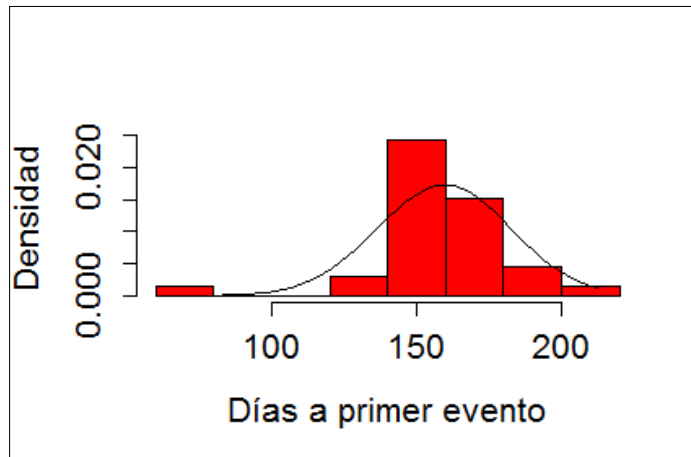
Gráfica No. 53. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación INIA La Estanzuela



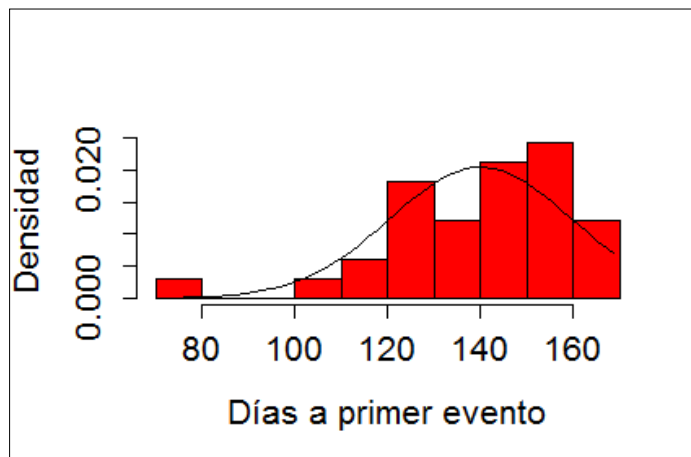
Gráfica No. 54. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación INIA La Estanzuela



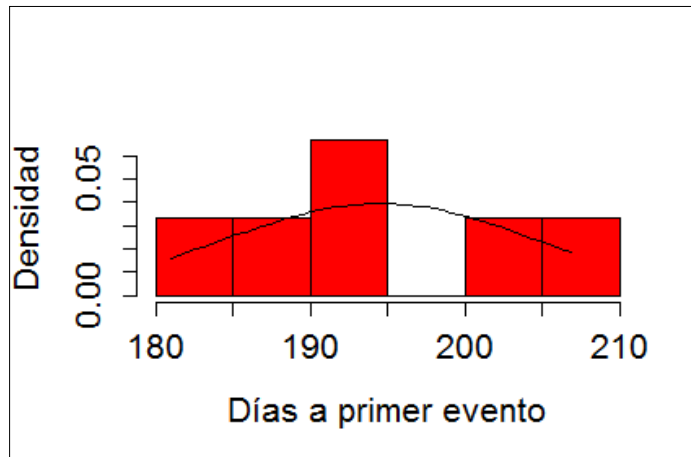
Gráfica No. 55. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación INIA La Estanzuela



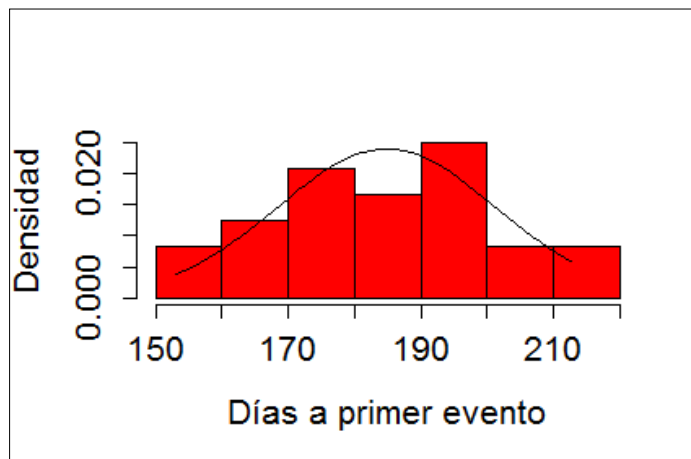
Gráfica No. 56. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación INIA La Estanzuela



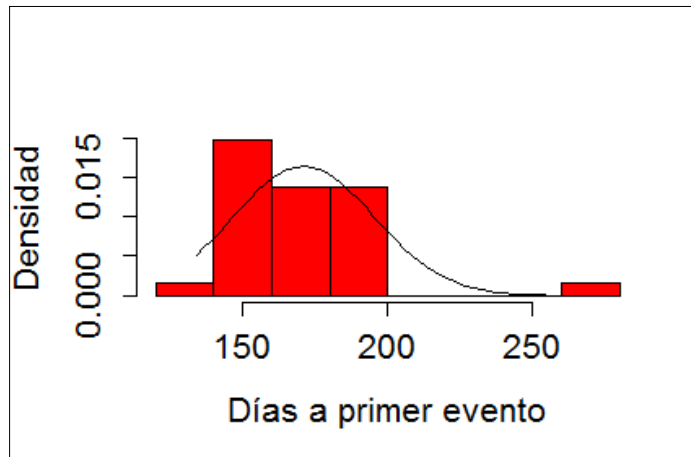
Gráfica No. 57. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación INIA Salto Grande



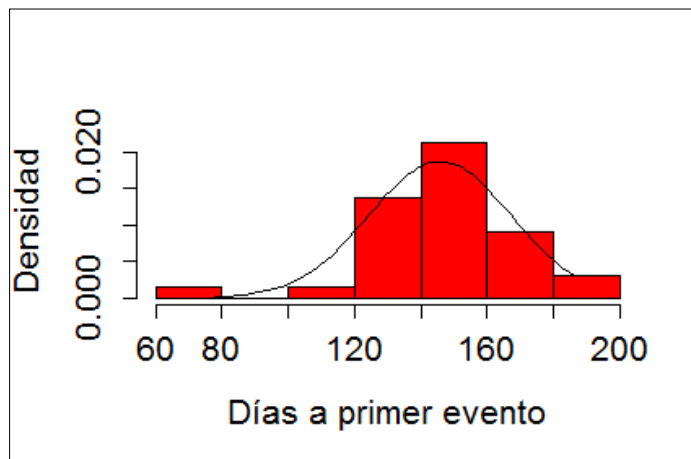
Gráfica No. 58. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación INIA Salto Grande



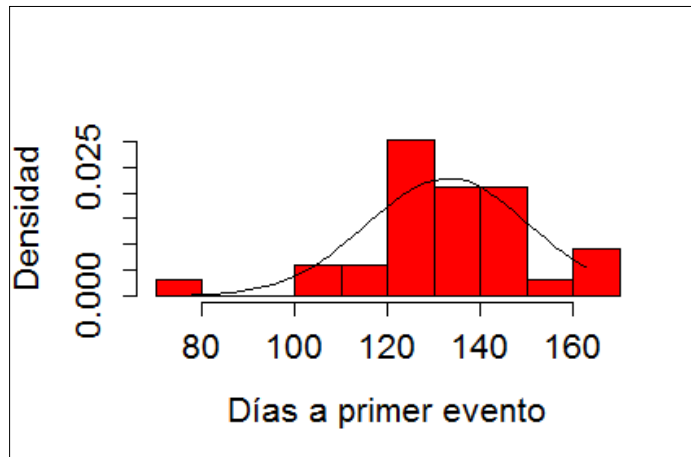
Gráfica No. 59. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación INIA Salto Grande



Gráfica No. 60. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación INIA Salto Grande

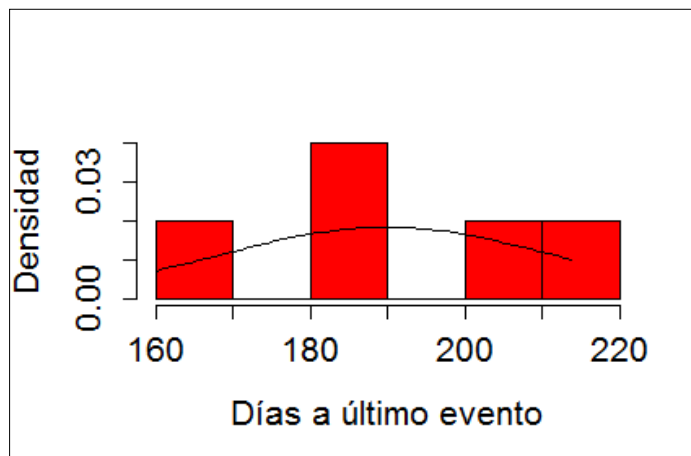


Gráfica No. 61. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de primeras heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación INIA Salto Grande

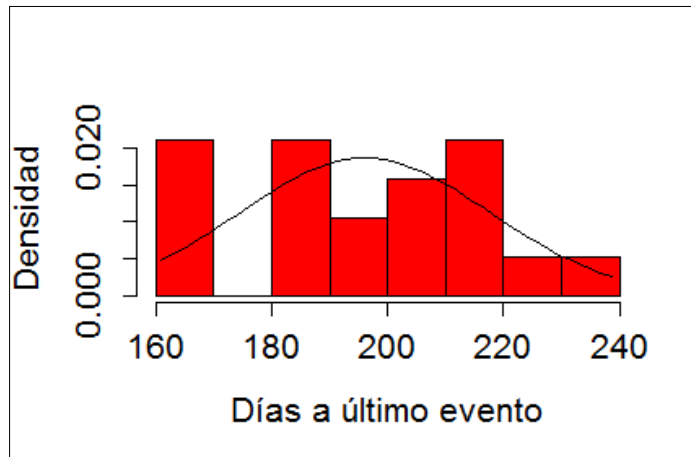


Anexo No. 4. Histogramas de densidad de muestras de fechas de ocurrencia de últimas heladas, para todos los umbrales (-4, -2, 0, 2 y 4 °C) y para cada una de las estaciones meteorológicas

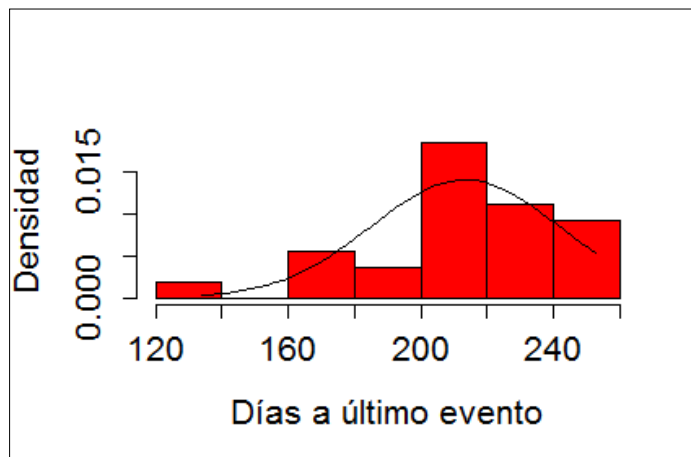
Gráfica No. 62. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral -4 °C, de la estación Artigas



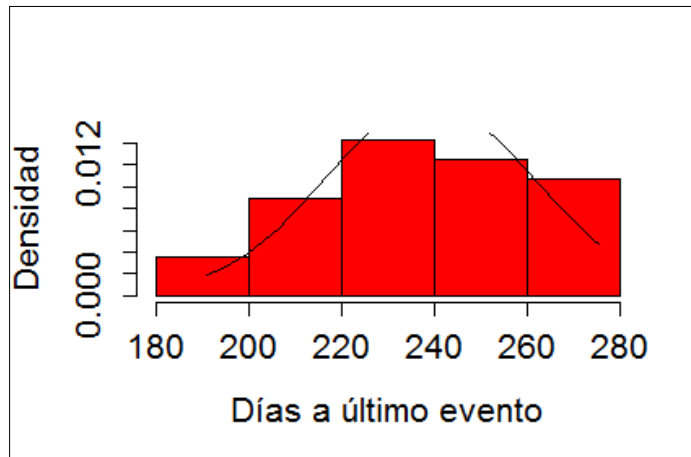
Gráfica No. 63. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Artigas



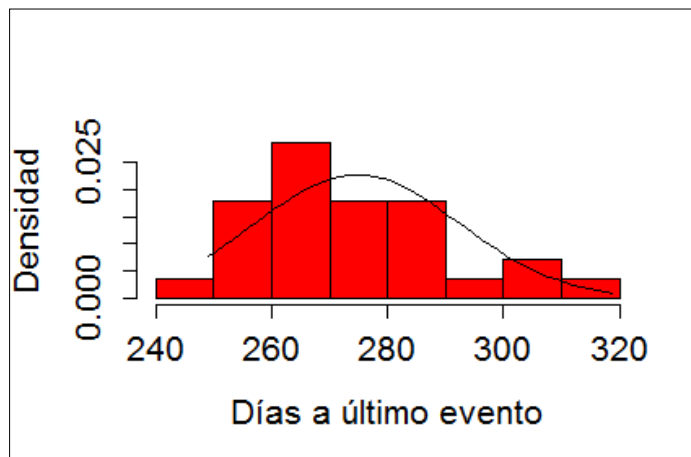
Gráfica No. 64. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Artigas



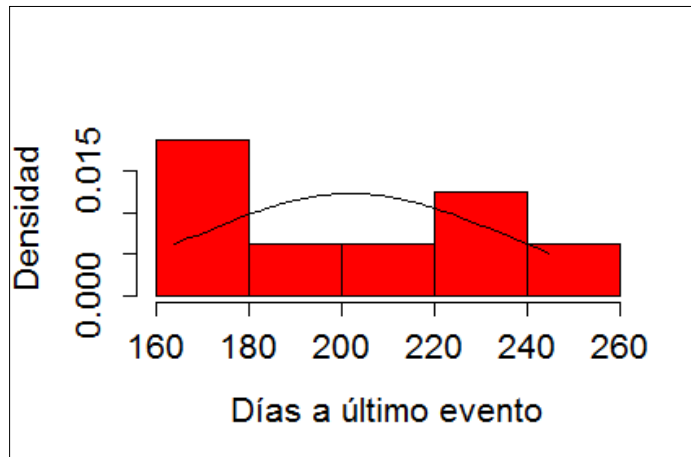
Gráfica No. 65. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Artigas



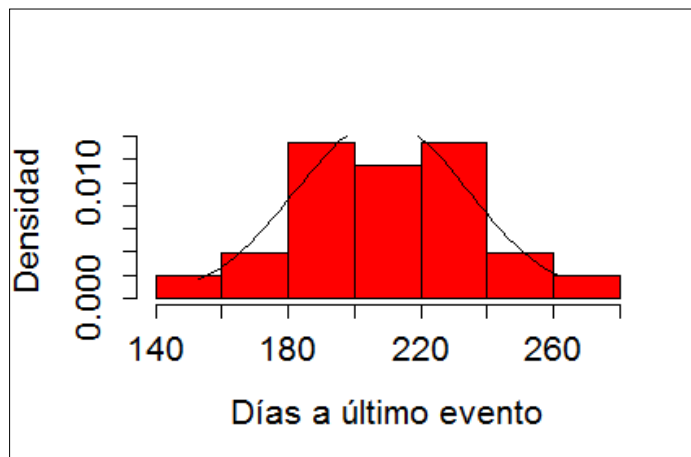
Gráfica No. 66. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Artigas



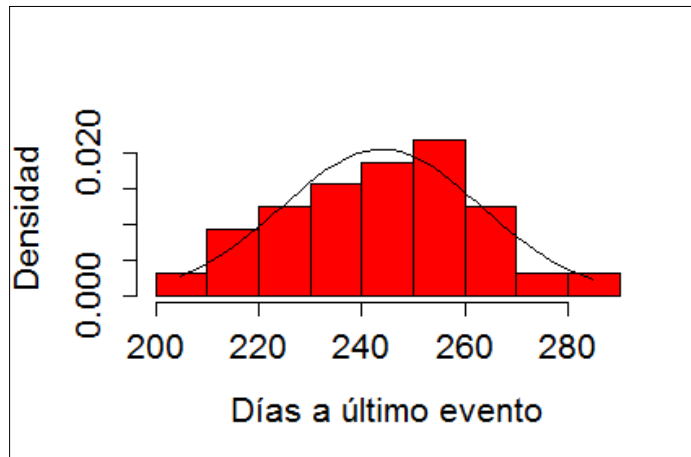
Gráfica No. 67. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Carrasco



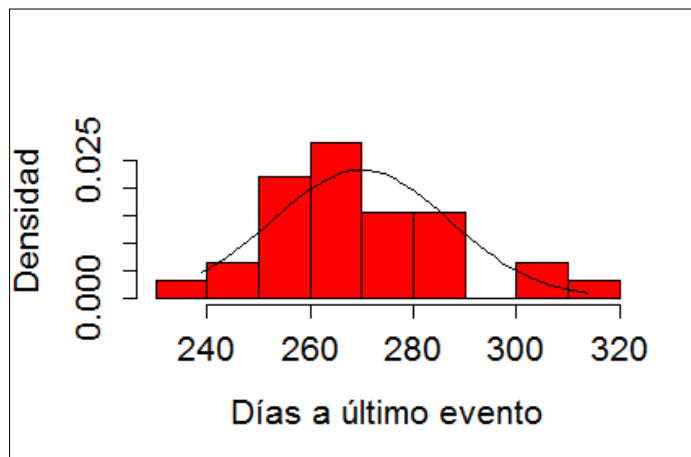
Gráfica No. 68. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Carrasco



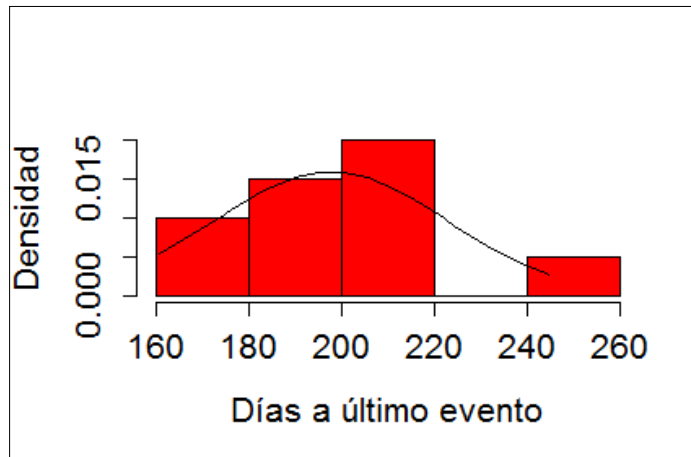
Gráfica No. 69. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Carrasco



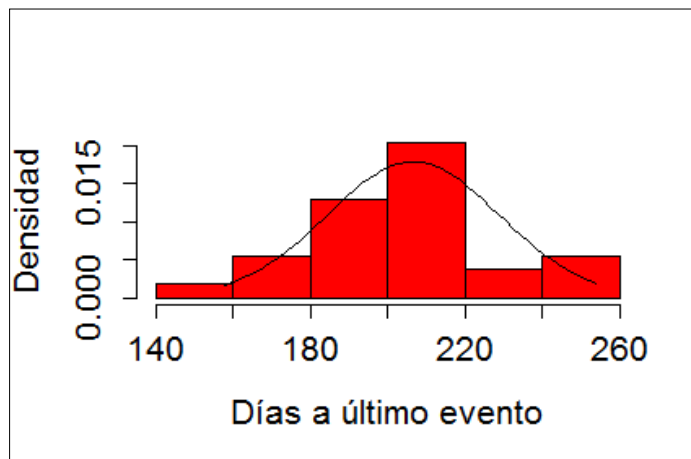
Gráfica No. 70. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Carrasco



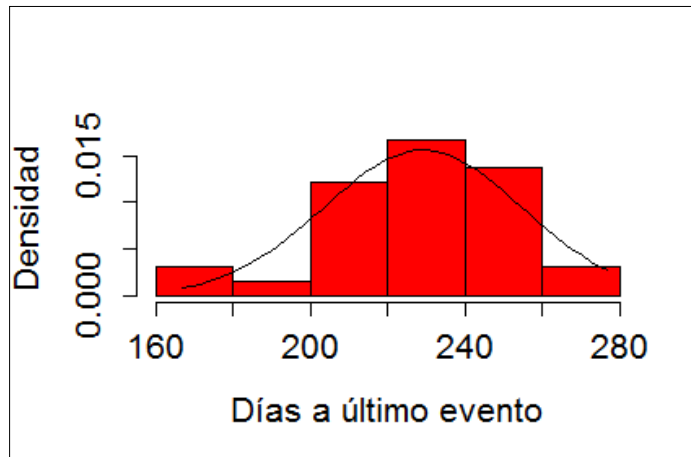
Gráfica No. 71. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Melo



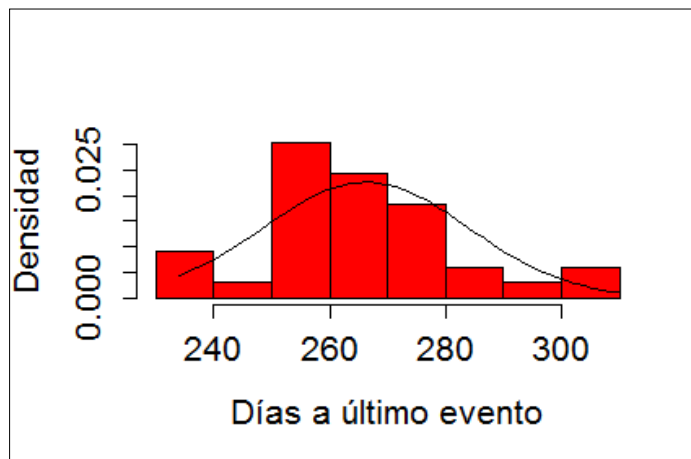
Gráfica No. 72. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Melo



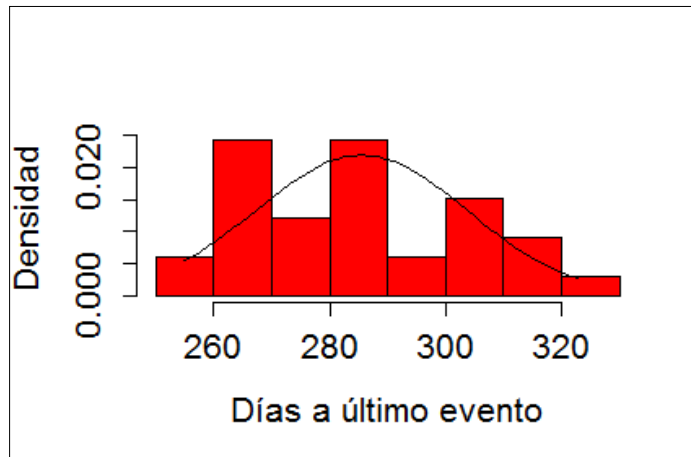
Gráfica No. 73. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación Melo



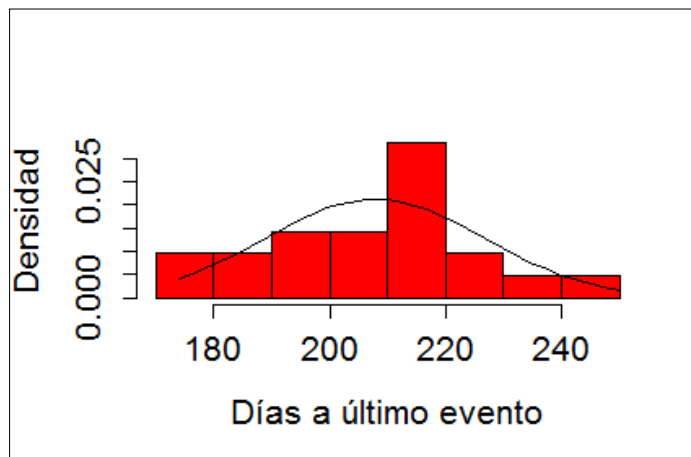
Gráfica No. 74. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Melo



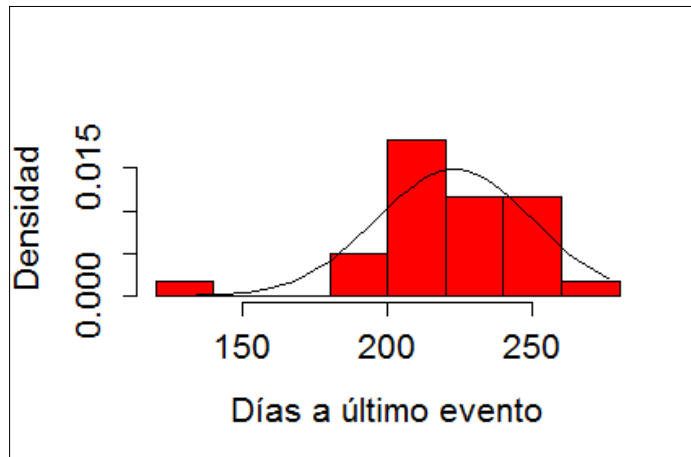
Gráfica No. 75. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Melo



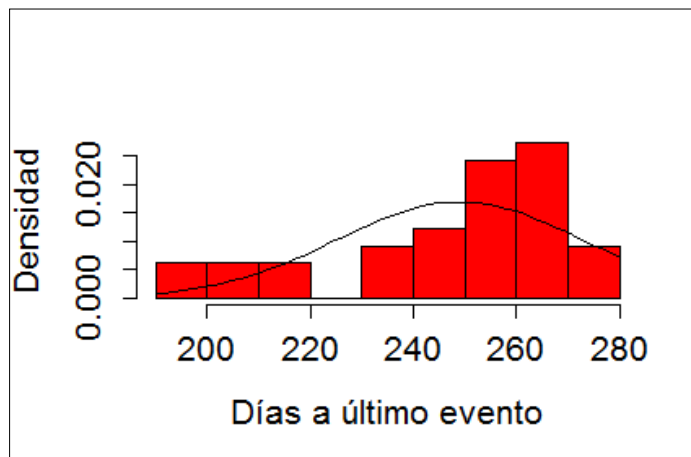
Gráfica No. 76. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral -4 °C, de la estación Mercedes



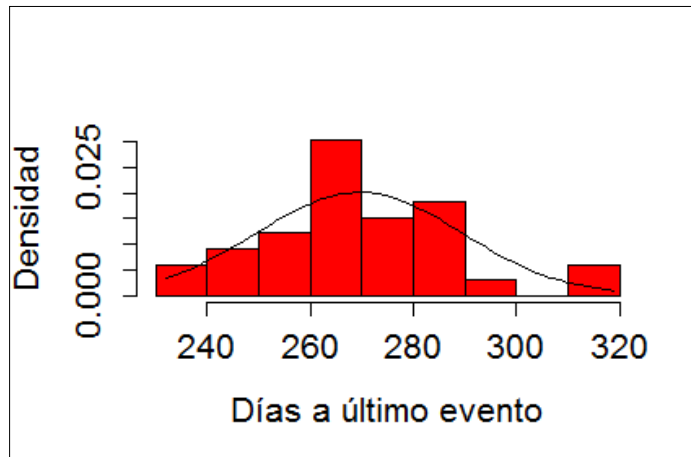
Gráfica No. 77. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Mercedes



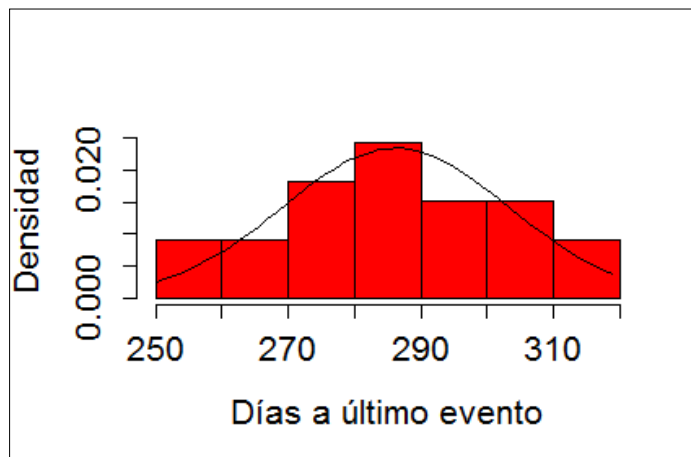
Gráfica No. 78. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Mercedes



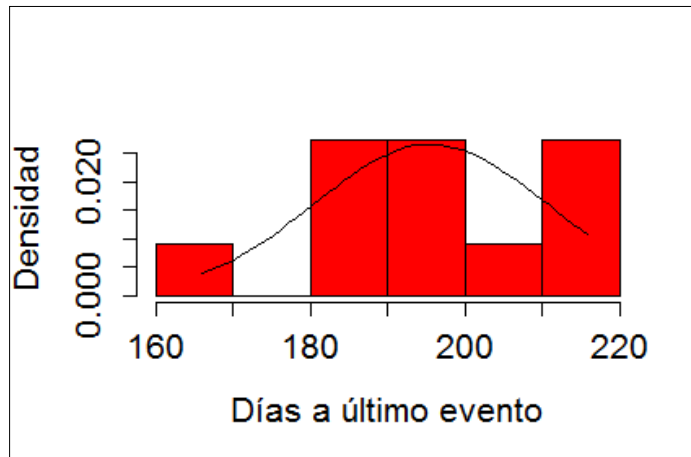
Gráfica No. 79. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Mercedes



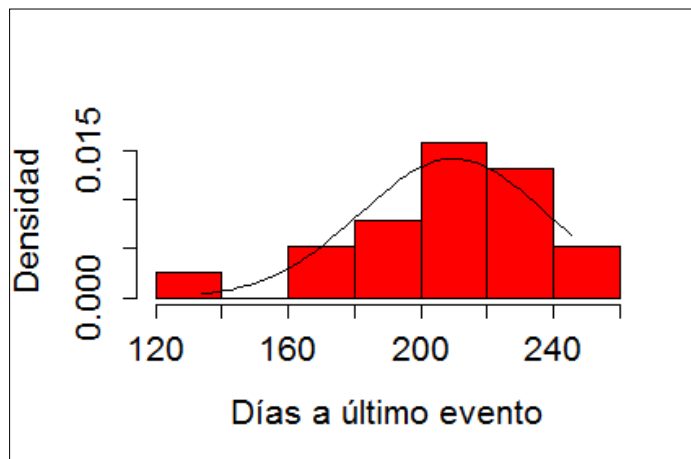
Gráfica No. 80. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Mercedes



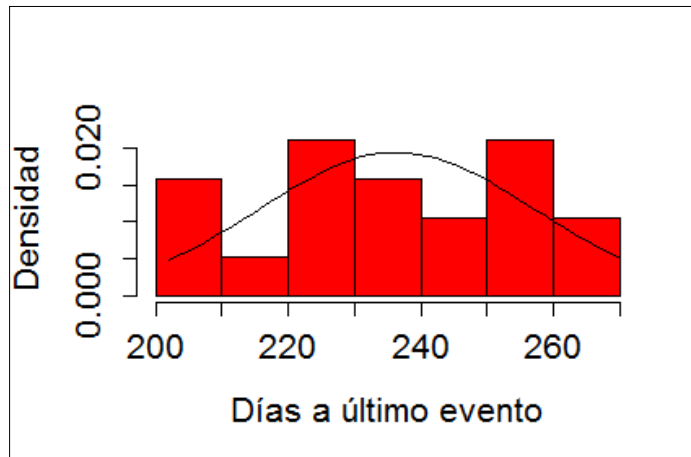
Gráfica No. 81. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Paso de los Toros



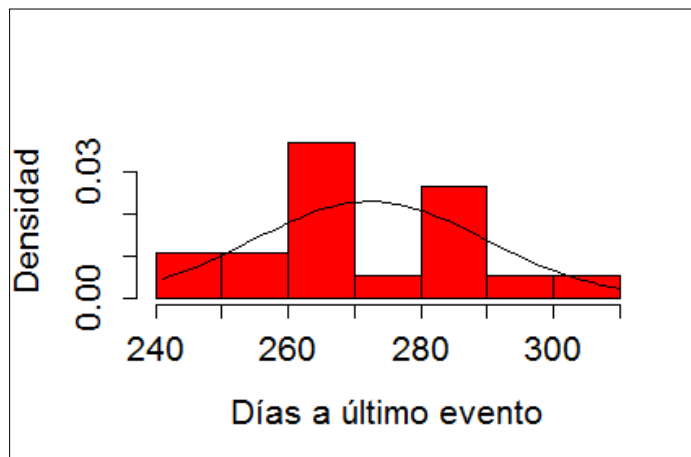
Gráfica No. 82. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Paso de los Toros



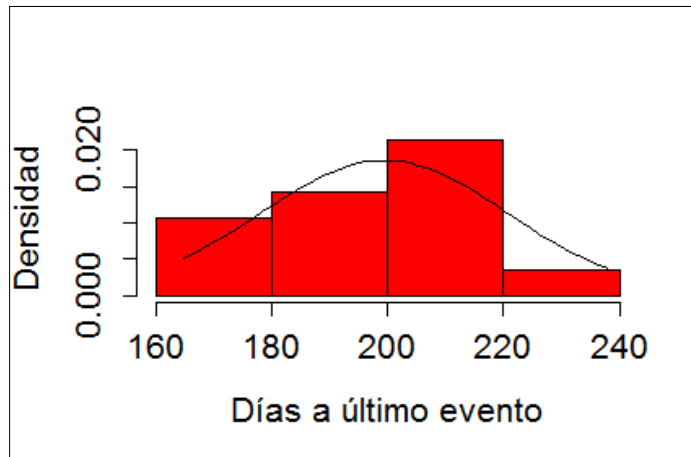
Gráfica No. 83. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Paso de los Toros



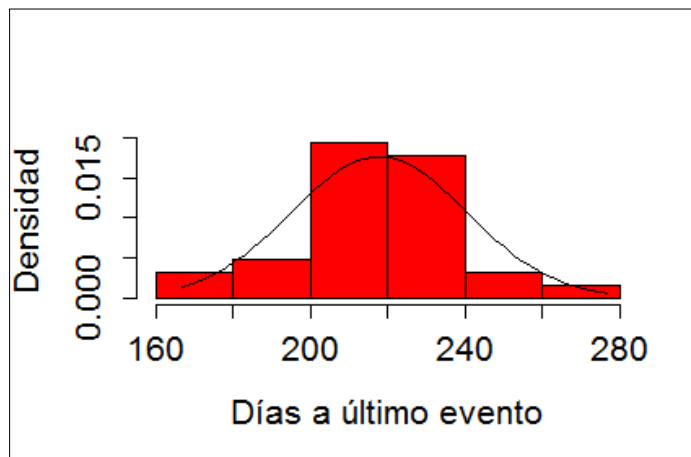
Gráfica No. 84. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Paso de los Toros



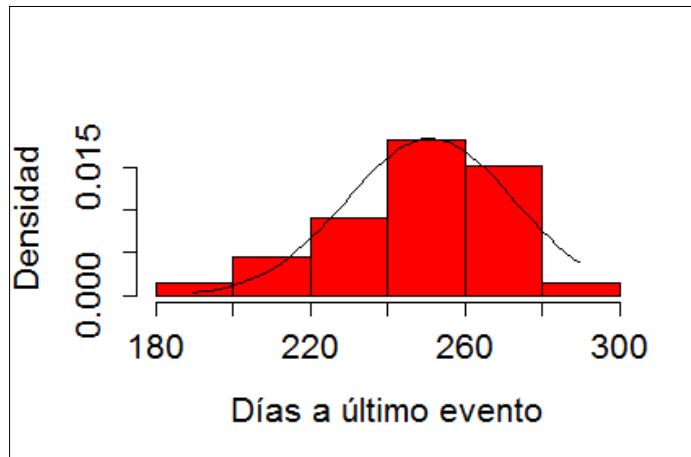
Gráfica No. 85. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Paysandú



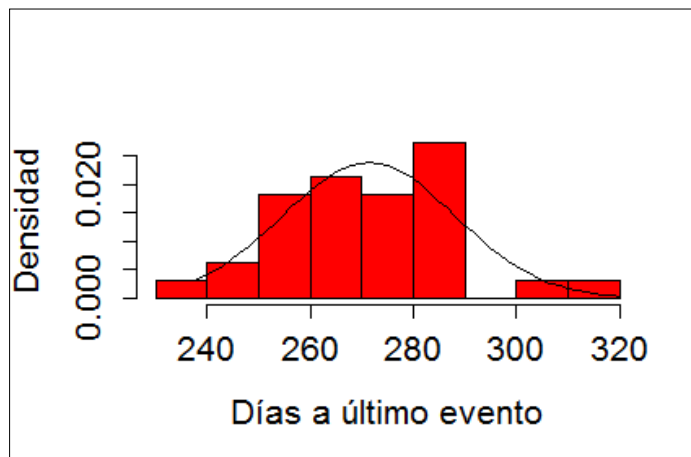
Gráfica No. 86. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Paysandú



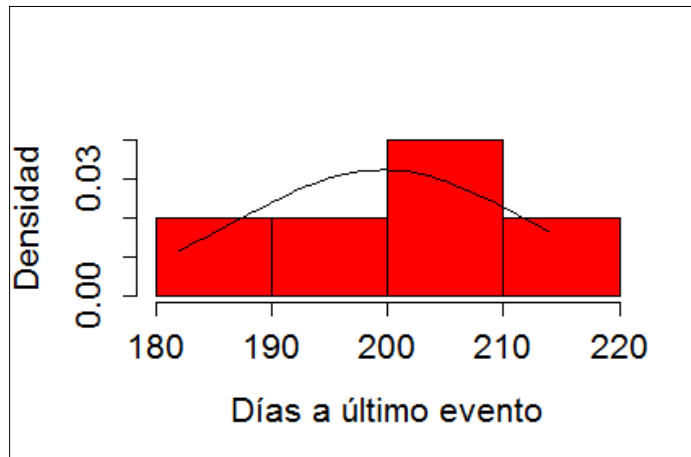
Gráfica No. 87. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Paysandú



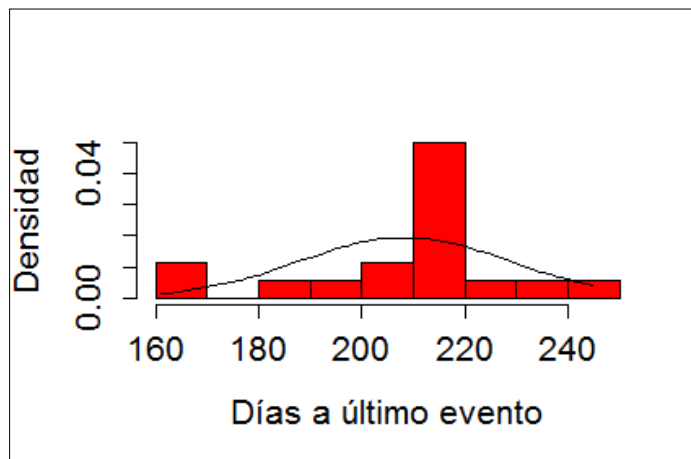
Gráfica No. 88. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Paysandú



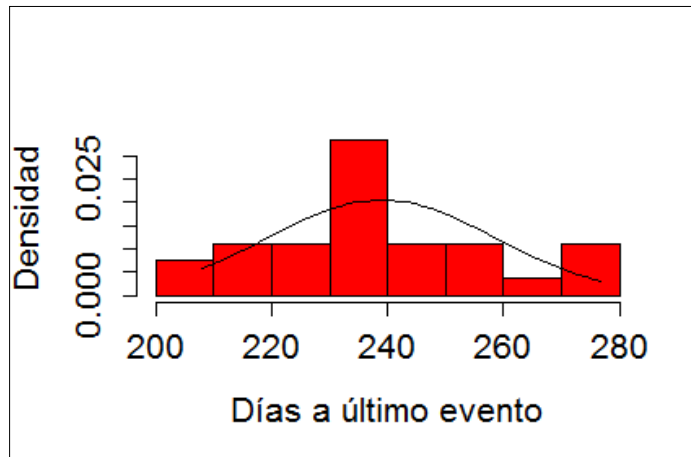
Gráfica No. 89. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Rivera



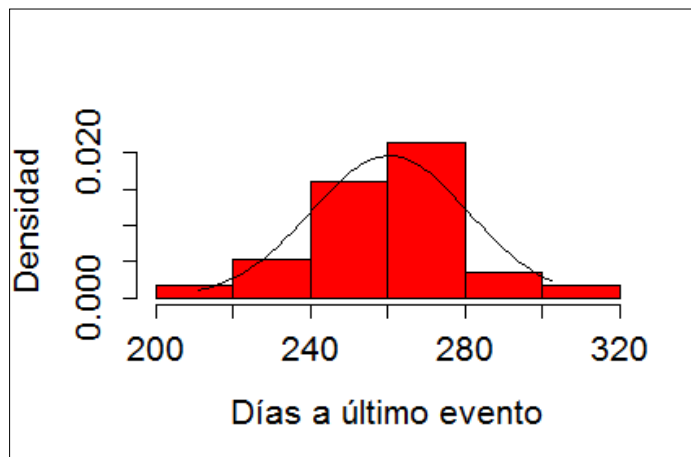
Gráfica No. 90. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Rivera



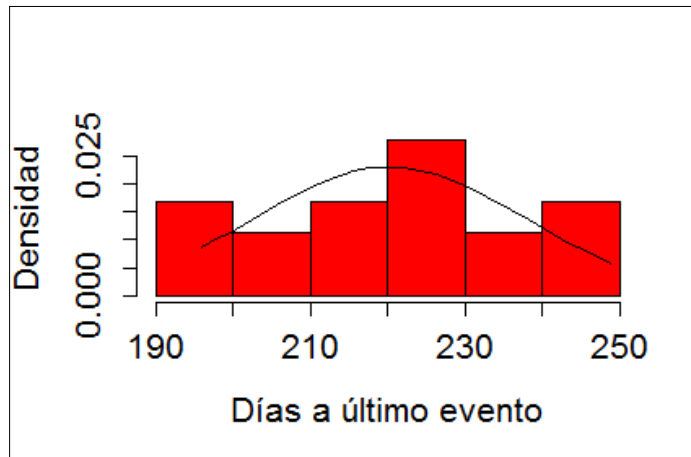
Gráfica No. 91. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Rivera



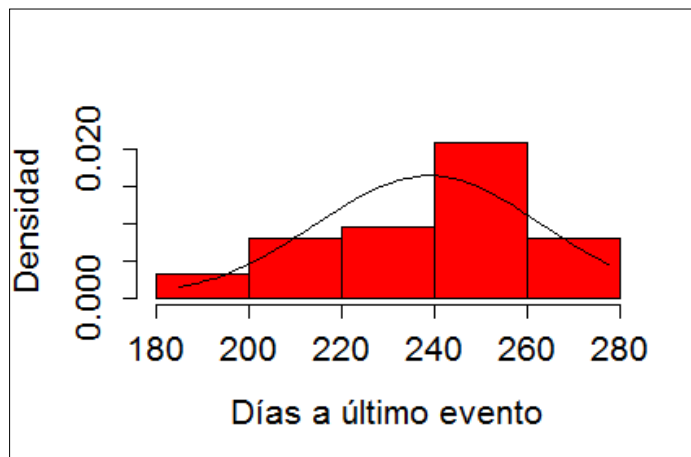
Gráfica No. 92. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Rivera



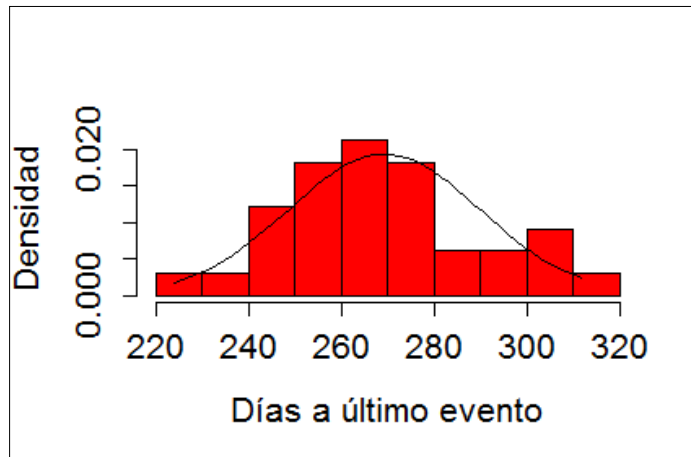
Gráfica No. 93. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Rocha



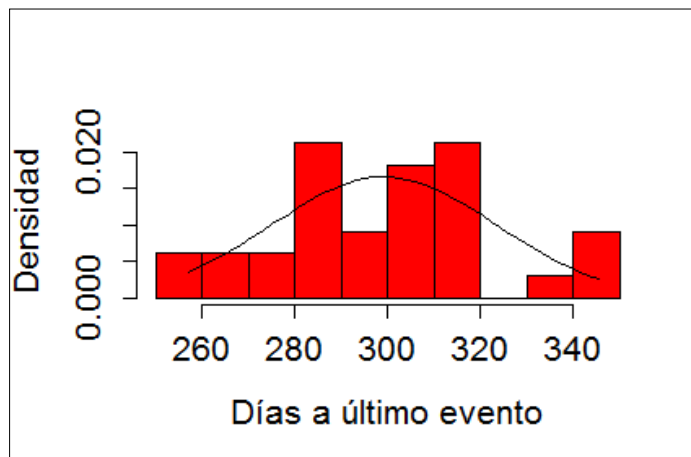
Gráfica No. 94. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Rocha



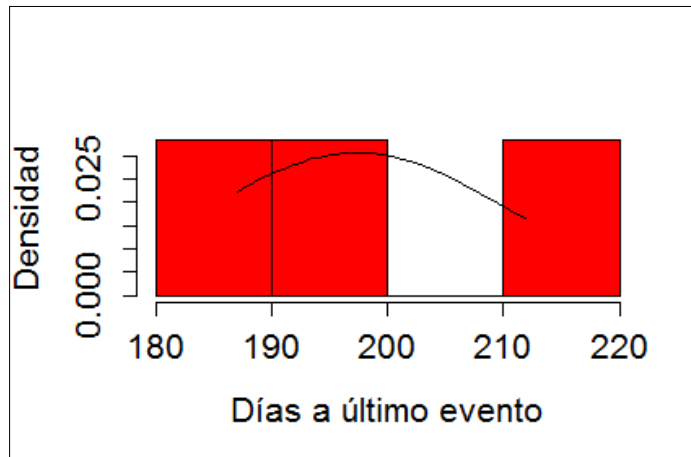
Gráfica No. 95. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Rocha



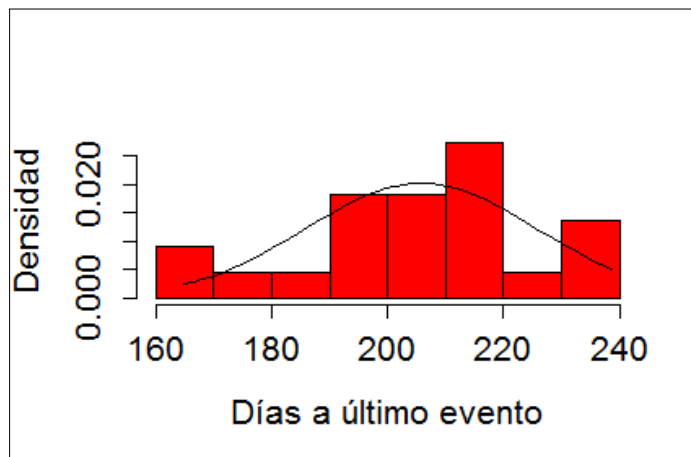
Gráfica No. 96. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Rocha



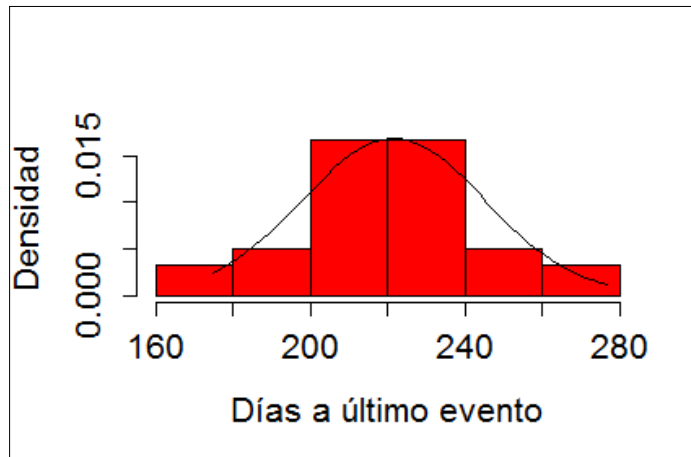
Gráfica No. 97. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Salto



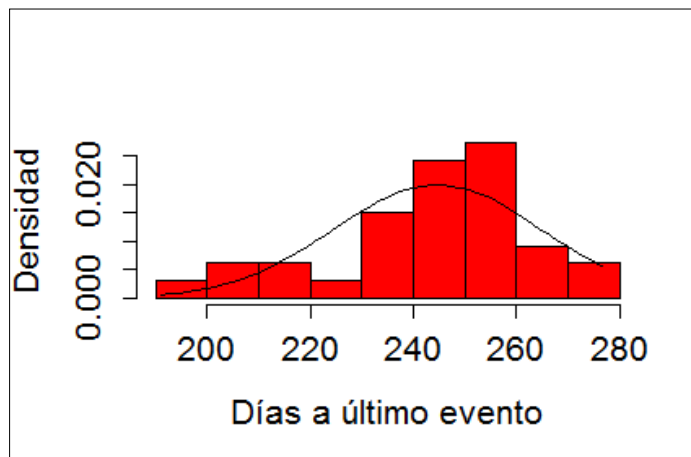
Gráfica No. 98. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación Salto



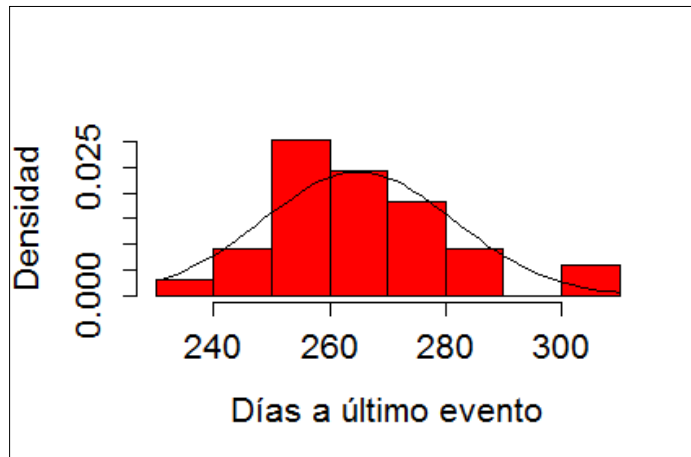
Gráfica No. 99. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación Salto



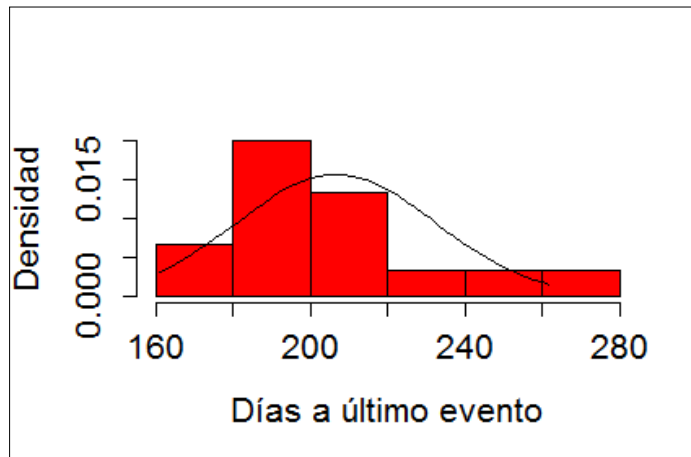
Gráfica No. 100. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Salto



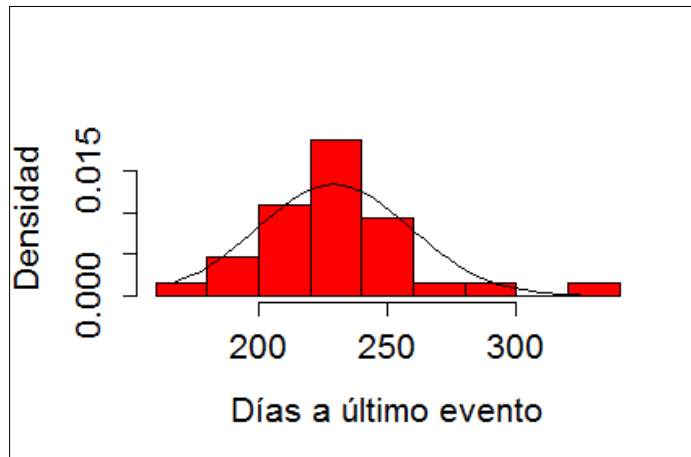
Gráfica No. 101. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Salto



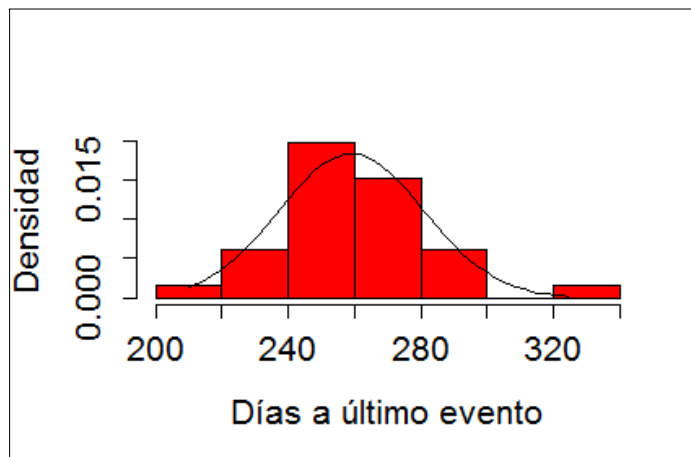
Gráfica No. 102. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación Sayago



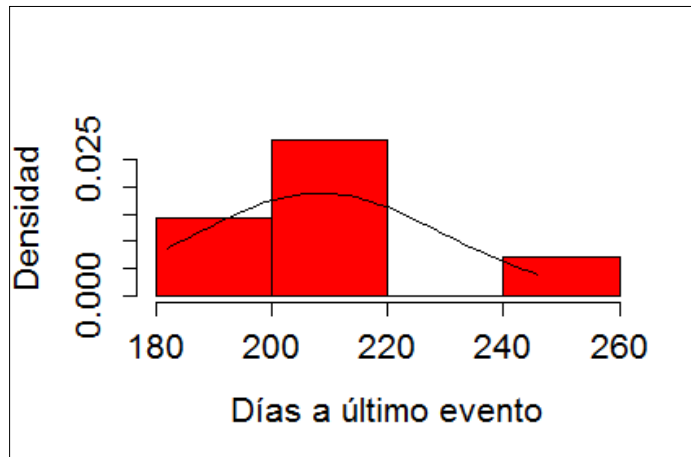
Gráfica No. 103. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación Sayago



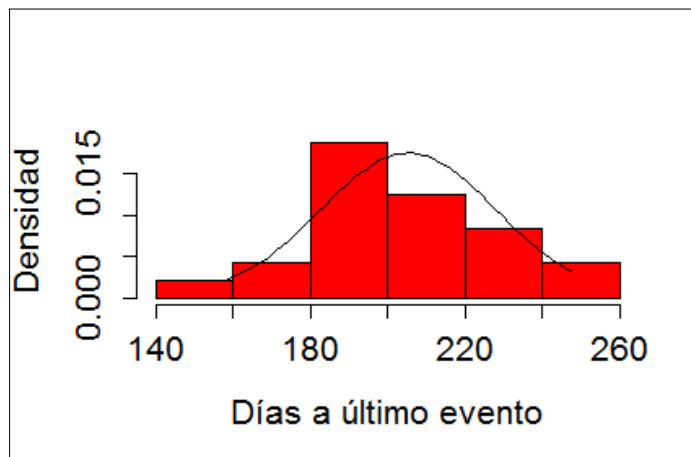
Gráfica No. 104. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación Sayago



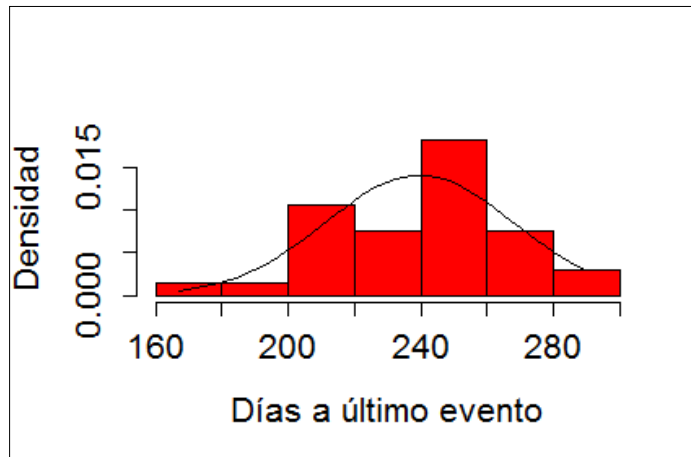
Gráfica No. 105. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación INIA Treinta y Tres



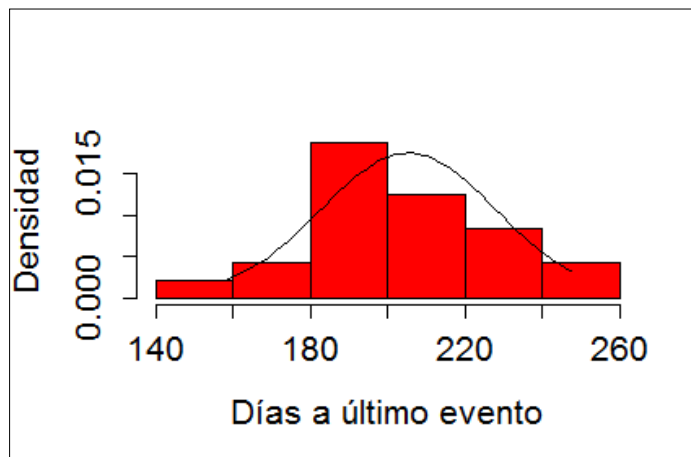
Gráfica No. 106. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación INIA Treinta y Tres



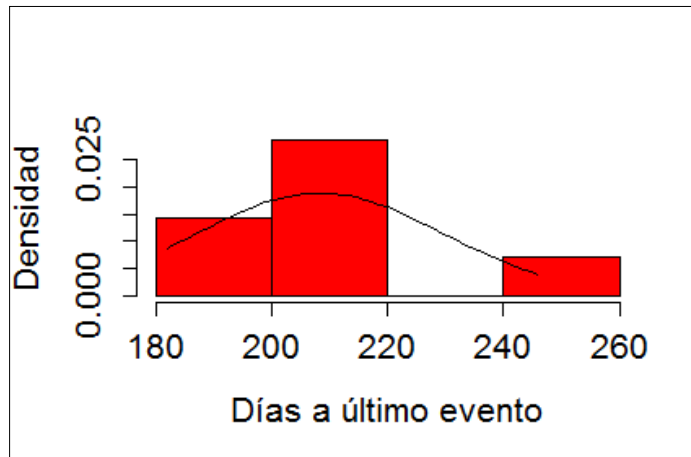
Gráfica No. 107. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación INIA Treinta y Tres



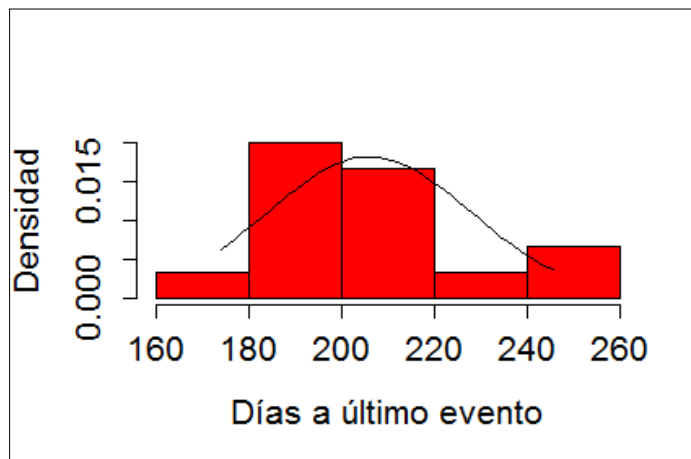
Gráfica No. 108. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación INIA Treinta y Tres



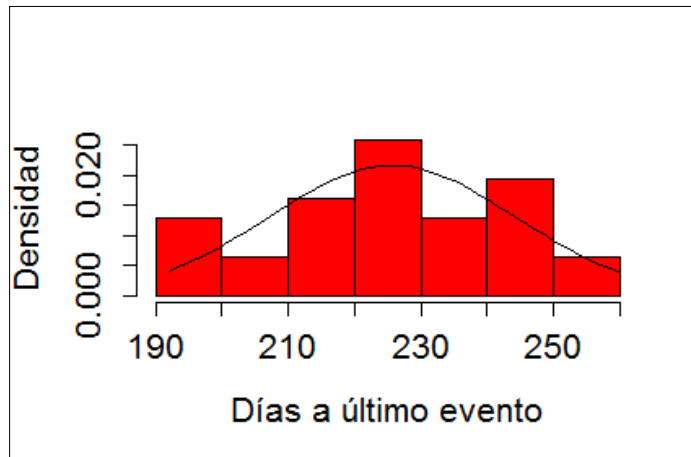
Gráfica No. 109. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación INIA Treinta y Tres



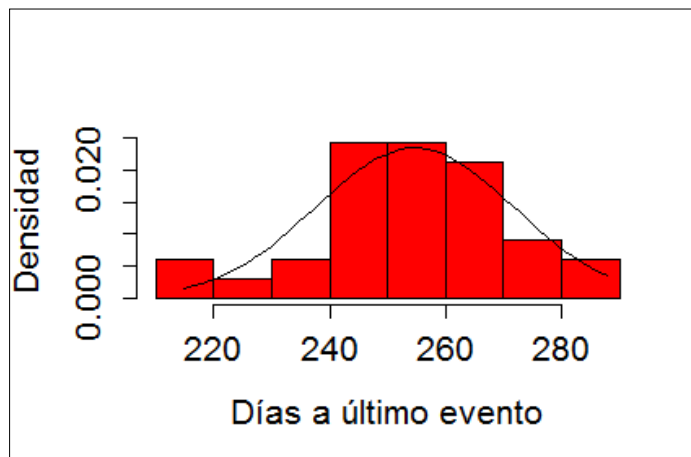
Gráfica No. 110. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral -2 °C, de la estación INIA Las Brujas



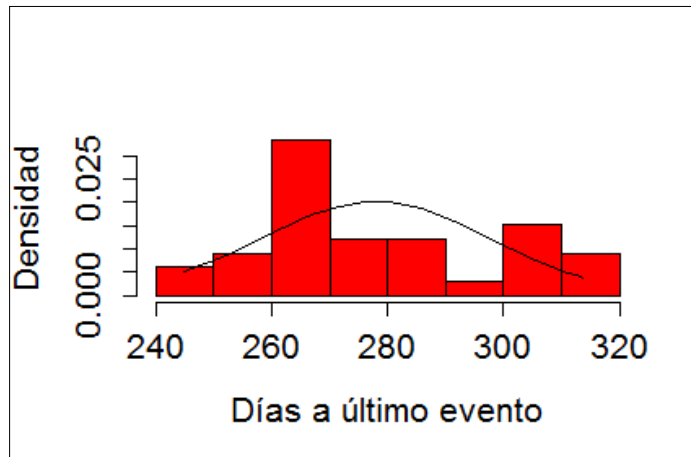
Gráfica No. 111. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación INIA Las Brujas



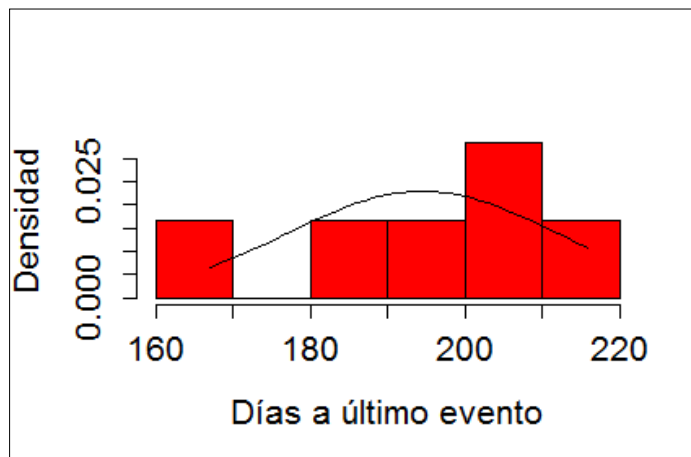
Gráfica No. 112. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación INIA Las Brujas



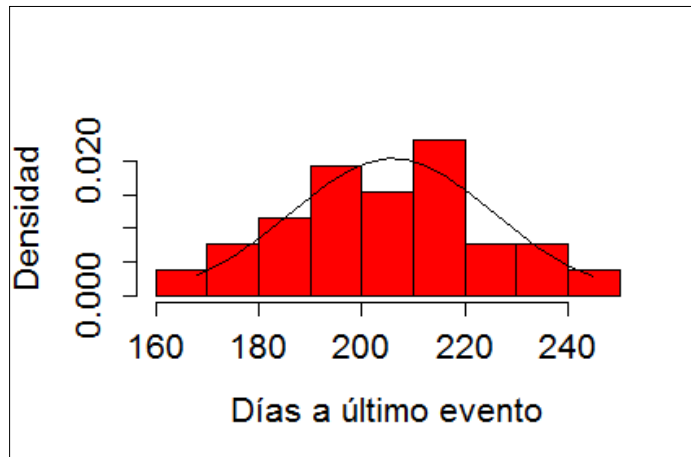
Gráfica No. 113. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación INIA Las Brujas



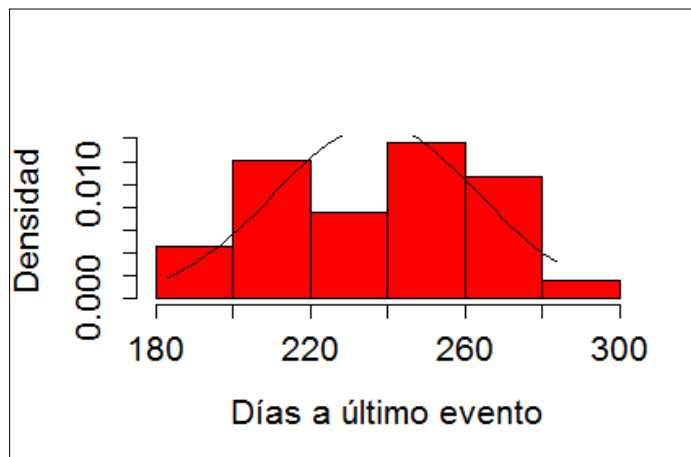
Gráfica No. 114. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral -2 °C, de la estación INIA La Estanzuela



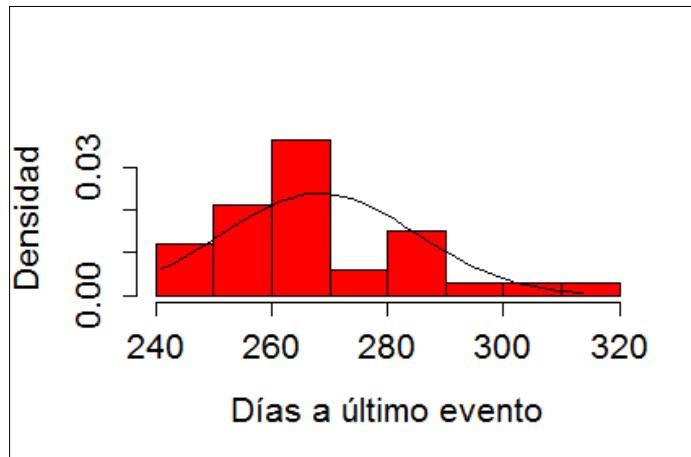
Gráfica No. 115. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 0 °C, de la estación INIA La Estanzuela



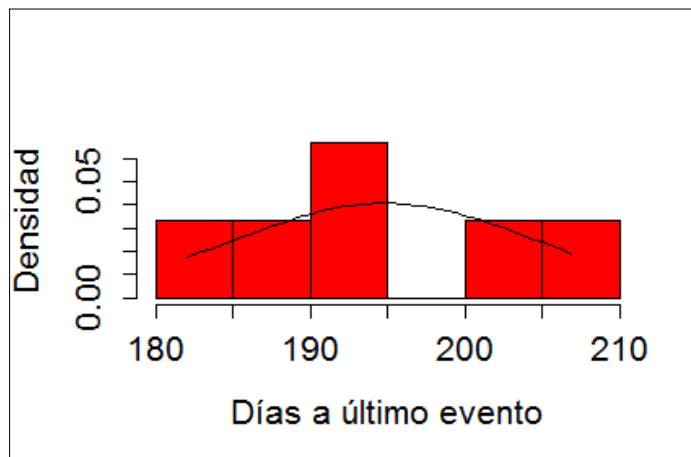
Gráfica No. 116. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación INIA La Estanzuela



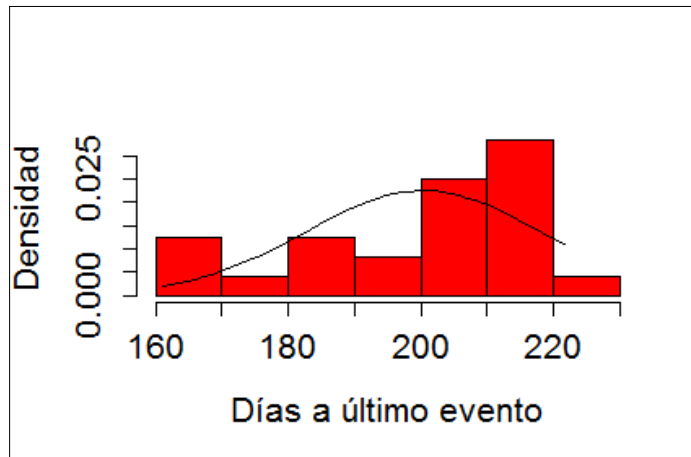
Gráfica No. 117. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación INIA La Estanzuela



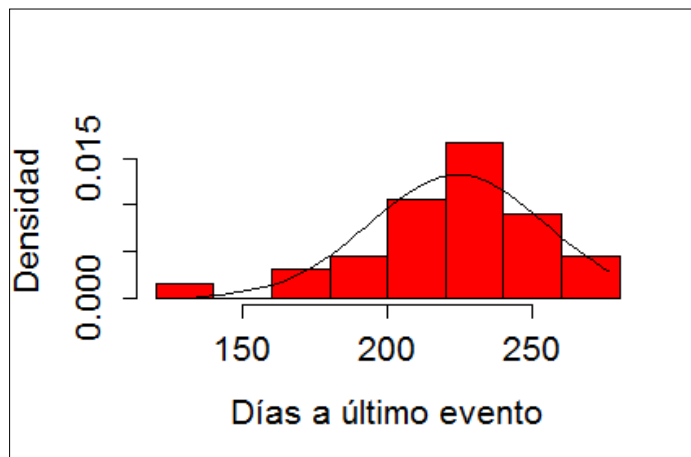
Gráfica No. 118. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral -4 °C, de la estación INIA Salto Grande



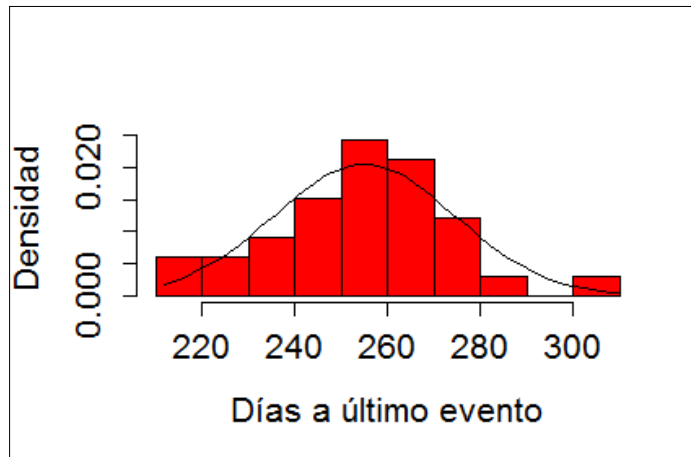
Gráfica No. 119. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación INIA Salto Grande



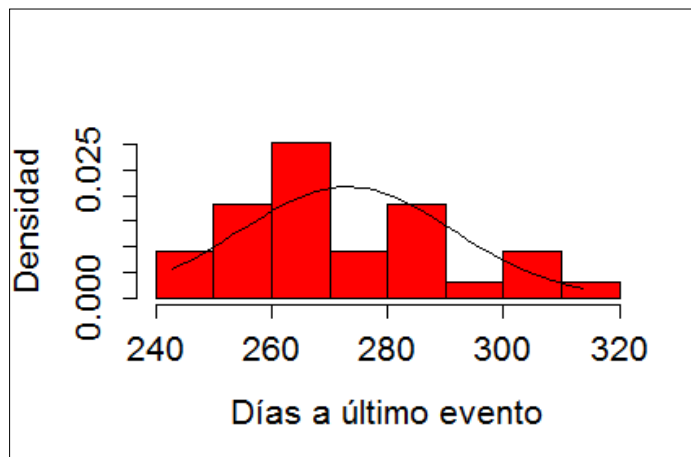
Gráfica No. 120. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la estación INIA Salto Grande



Gráfica No. 121. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 2 °C, de la estación INIA Salto Grande



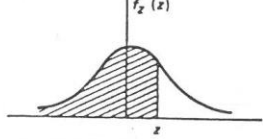
Gráfica No. 122. Histograma de densidad de fechas de ocurrencia de últimas heladas y la curva normal teórica, del umbral 4 °C, de la estación INIA Salto Grande



Anexo No. 5. Tabas de probabilidades de la normal estándar z

Tabla 9A . Distribución normal estandarizada (Said Infante y G. Zárate de Lara. Métodos Estadísticos. Edit. Trillas).

Probabilidades acumuladas de la distribución Normal estándar
 La tabla da el área a la izquierda de un valor de Z o sea: $\int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt$.



| Z | 0.0 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.09 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| -3.5 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 |
| -3.4 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 |
| -3.3 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0004 | 0.0004 | 0.0004 | 0.0004 | 0.0004 | 0.0003 |
| -3.2 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 |
| -3.1 | 0.0010 | 0.0009 | 0.0009 | 0.0009 | 0.0008 | 0.0008 | 0.0008 | 0.0008 | 0.0007 | 0.0007 |
| -3.0 | 0.0013 | 0.0013 | 0.0013 | 0.0012 | 0.0012 | 0.0011 | 0.0011 | 0.0011 | 0.0010 | 0.0010 |
| -2.9 | 0.0019 | 0.0018 | 0.0018 | 0.0017 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0014 | 0.0014 |
| -2.8 | 0.0026 | 0.0025 | 0.0024 | 0.0023 | 0.0023 | 0.0022 | 0.0021 | 0.0021 | 0.0020 | 0.0019 |
| -2.7 | 0.0035 | 0.0034 | 0.0033 | 0.0032 | 0.0031 | 0.0030 | 0.0029 | 0.0028 | 0.0027 | 0.0026 |
| -2.6 | 0.0047 | 0.0045 | 0.0044 | 0.0043 | 0.0041 | 0.0040 | 0.0039 | 0.0038 | 0.0037 | 0.0036 |
| -2.5 | 0.0062 | 0.0060 | 0.0059 | 0.0057 | 0.0055 | 0.0054 | 0.0052 | 0.0051 | 0.0049 | 0.0048 |
| -2.4 | 0.0082 | 0.0080 | 0.0078 | 0.0075 | 0.0073 | 0.0071 | 0.0069 | 0.0068 | 0.0066 | 0.0064 |
| -2.3 | 0.0107 | 0.0104 | 0.0102 | 0.0099 | 0.0096 | 0.0094 | 0.0091 | 0.0089 | 0.0087 | 0.0084 |
| -2.2 | 0.0139 | 0.0136 | 0.0132 | 0.0129 | 0.0125 | 0.0122 | 0.0119 | 0.0116 | 0.0113 | 0.0110 |
| -2.1 | 0.0179 | 0.0174 | 0.0170 | 0.0166 | 0.0162 | 0.0158 | 0.0154 | 0.0150 | 0.0146 | 0.0143 |
| -2.0 | 0.0228 | 0.0222 | 0.0217 | 0.0212 | 0.0207 | 0.0202 | 0.0197 | 0.0192 | 0.0188 | 0.0183 |
| -1.9 | 0.0287 | 0.0281 | 0.0274 | 0.0268 | 0.0262 | 0.0256 | 0.0250 | 0.0244 | 0.0239 | 0.0233 |
| -1.8 | 0.0359 | 0.0351 | 0.0344 | 0.0336 | 0.0329 | 0.0322 | 0.0314 | 0.0307 | 0.0301 | 0.0294 |
| -1.7 | 0.0446 | 0.0436 | 0.0427 | 0.0418 | 0.0409 | 0.0401 | 0.0392 | 0.0384 | 0.0375 | 0.0367 |
| -1.6 | 0.0548 | 0.0537 | 0.0526 | 0.0516 | 0.0505 | 0.0495 | 0.0485 | 0.0475 | 0.0465 | 0.0455 |
| -1.5 | 0.0668 | 0.0655 | 0.0643 | 0.0630 | 0.0618 | 0.0606 | 0.0594 | 0.0582 | 0.0571 | 0.0559 |
| -1.4 | 0.0808 | 0.0793 | 0.0778 | 0.0764 | 0.0749 | 0.0735 | 0.0721 | 0.0708 | 0.0694 | 0.0681 |
| -1.3 | 0.0968 | 0.0951 | 0.0934 | 0.0918 | 0.0901 | 0.0885 | 0.0869 | 0.0853 | 0.0838 | 0.0823 |
| -1.2 | 0.1151 | 0.1131 | 0.1112 | 0.1093 | 0.1075 | 0.1056 | 0.1038 | 0.1020 | 0.1003 | 0.0985 |
| -1.1 | 0.1357 | 0.1335 | 0.1314 | 0.1292 | 0.1271 | 0.1251 | 0.1230 | 0.1210 | 0.1190 | 0.1170 |
| -1.0 | 0.1587 | 0.1562 | 0.1539 | 0.1515 | 0.1492 | 0.1469 | 0.1446 | 0.1423 | 0.1401 | 0.1379 |
| -0.9 | 0.1841 | 0.1814 | 0.1788 | 0.1762 | 0.1736 | 0.1711 | 0.1685 | 0.1660 | 0.1635 | 0.1611 |
| -0.8 | 0.2119 | 0.2090 | 0.2061 | 0.2033 | 0.2005 | 0.1977 | 0.1949 | 0.1922 | 0.1894 | 0.1867 |
| -0.7 | 0.2420 | 0.2389 | 0.2358 | 0.2327 | 0.2296 | 0.2266 | 0.2236 | 0.2206 | 0.2177 | 0.2148 |
| -0.6 | 0.2743 | 0.2709 | 0.2676 | 0.2643 | 0.2611 | 0.2578 | 0.2546 | 0.2514 | 0.2483 | 0.2451 |
| -0.5 | 0.3085 | 0.3050 | 0.3015 | 0.2981 | 0.2946 | 0.2912 | 0.2877 | 0.2843 | 0.2810 | 0.2776 |
| -0.4 | 0.3446 | 0.3409 | 0.3372 | 0.3336 | 0.3300 | 0.3264 | 0.3228 | 0.3192 | 0.3156 | 0.3121 |
| -0.3 | 0.3821 | 0.3783 | 0.3745 | 0.3707 | 0.3669 | 0.3632 | 0.3594 | 0.3557 | 0.3520 | 0.3483 |
| -0.2 | 0.4207 | 0.4168 | 0.4129 | 0.4090 | 0.4052 | 0.4013 | 0.3974 | 0.3936 | 0.3897 | 0.3859 |
| -0.1 | 0.4602 | 0.4562 | 0.4522 | 0.4483 | 0.4443 | 0.4404 | 0.4364 | 0.4325 | 0.4286 | 0.4247 |
| 0.0 | 0.5000 | 0.4960 | 0.4920 | 0.4880 | 0.4840 | 0.4801 | 0.4761 | 0.4721 | 0.4681 | 0.4641 |

Fuente: Villalpando (1985).

Tabla 9A . Continuación.

| Z | 0.0 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.09 |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0 | 0.5000 | 0.5040 | 0.5080 | 0.5120 | 0.5160 | 0.5199 | 0.5239 | 0.5279 | 0.5319 | 0.5359 |
| 0.1 | 0.5398 | 0.5438 | 0.5478 | 0.5517 | 0.5557 | 0.5596 | 0.5636 | 0.5675 | 0.5714 | 0.5753 |
| 0.2 | 0.5793 | 0.5832 | 0.5871 | 0.5910 | 0.5948 | 0.5987 | 0.6026 | 0.6064 | 0.6103 | 0.6141 |
| 0.3 | 0.6179 | 0.6217 | 0.6255 | 0.6293 | 0.6331 | 0.6368 | 0.6406 | 0.6443 | 0.6480 | 0.6517 |
| 0.4 | 0.6554 | 0.6591 | 0.6628 | 0.6664 | 0.6700 | 0.6736 | 0.6772 | 0.6808 | 0.6844 | 0.6879 |
| 0.5 | 0.6915 | 0.6950 | 0.6985 | 0.7019 | 0.7054 | 0.7088 | 0.7123 | 0.7157 | 0.7190 | 0.7224 |
| 0.6 | 0.7257 | 0.7291 | 0.7324 | 0.7357 | 0.7389 | 0.7422 | 0.7454 | 0.7486 | 0.7517 | 0.7549 |
| 0.7 | 0.7580 | 0.7611 | 0.7642 | 0.7673 | 0.7704 | 0.7734 | 0.7764 | 0.7794 | 0.7823 | 0.7852 |
| 0.8 | 0.7881 | 0.7910 | 0.7939 | 0.7967 | 0.7995 | 0.8023 | 0.8051 | 0.8078 | 0.8106 | 0.8133 |
| 0.9 | 0.8159 | 0.8186 | 0.8212 | 0.8238 | 0.8264 | 0.8289 | 0.8315 | 0.8340 | 0.8365 | 0.8389 |
| 1.0 | 0.8413 | 0.8438 | 0.8461 | 0.8485 | 0.8508 | 0.8531 | 0.8554 | 0.8577 | 0.8599 | 0.8621 |
| 1.1 | 0.8643 | 0.8665 | 0.8686 | 0.8708 | 0.8729 | 0.8749 | 0.8770 | 0.8790 | 0.8810 | 0.8830 |
| 1.2 | 0.8849 | 0.8869 | 0.8888 | 0.8907 | 0.8925 | 0.8944 | 0.8962 | 0.8980 | 0.8997 | 0.9015 |
| 1.3 | 0.9032 | 0.9049 | 0.9066 | 0.9082 | 0.9099 | 0.9115 | 0.9131 | 0.9147 | 0.9162 | 0.9177 |
| 1.4 | 0.9192 | 0.9207 | 0.9222 | 0.9236 | 0.9251 | 0.9265 | 0.9279 | 0.9292 | 0.9306 | 0.9319 |
| 1.5 | 0.9332 | 0.9345 | 0.9357 | 0.9370 | 0.9382 | 0.9394 | 0.9406 | 0.9418 | 0.9429 | 0.9441 |
| 1.6 | 0.9452 | 0.9463 | 0.9474 | 0.9484 | 0.9495 | 0.9505 | 0.9515 | 0.9525 | 0.9535 | 0.9545 |
| 1.7 | 0.9554 | 0.9564 | 0.9573 | 0.9582 | 0.9591 | 0.9599 | 0.9608 | 0.9616 | 0.9625 | 0.9633 |
| 1.8 | 0.9641 | 0.9649 | 0.9656 | 0.9664 | 0.9671 | 0.9678 | 0.9686 | 0.9693 | 0.9699 | 0.9706 |
| 1.9 | 0.9713 | 0.9719 | 0.9726 | 0.9732 | 0.9738 | 0.9744 | 0.9750 | 0.9756 | 0.9761 | 0.9767 |
| 2.0 | 0.9772 | 0.9778 | 0.9783 | 0.9788 | 0.9793 | 0.9798 | 0.9803 | 0.9808 | 0.9812 | 0.9817 |
| 2.1 | 0.9821 | 0.9826 | 0.9830 | 0.9834 | 0.9838 | 0.9842 | 0.9846 | 0.9850 | 0.9854 | 0.9857 |
| 2.2 | 0.9861 | 0.9864 | 0.9868 | 0.9871 | 0.9875 | 0.9878 | 0.9881 | 0.9884 | 0.9887 | 0.9890 |
| 2.3 | 0.9893 | 0.9896 | 0.9898 | 0.9901 | 0.9904 | 0.9906 | 0.9909 | 0.9911 | 0.9913 | 0.9916 |
| 2.4 | 0.9918 | 0.9920 | 0.9922 | 0.9925 | 0.9927 | 0.9929 | 0.9931 | 0.9932 | 0.9934 | 0.9936 |
| 2.5 | 0.9938 | 0.9940 | 0.9941 | 0.9943 | 0.9945 | 0.9946 | 0.9948 | 0.9949 | 0.9951 | 0.9952 |
| 2.6 | 0.9953 | 0.9955 | 0.9956 | 0.9957 | 0.9959 | 0.9960 | 0.9961 | 0.9962 | 0.9963 | 0.9964 |
| 2.7 | 0.9965 | 0.9966 | 0.9967 | 0.9968 | 0.9969 | 0.9970 | 0.9971 | 0.9972 | 0.9973 | 0.9974 |
| 2.8 | 0.9974 | 0.9975 | 0.9976 | 0.9977 | 0.9977 | 0.9978 | 0.9979 | 0.9979 | 0.9980 | 0.9981 |
| 2.9 | 0.9981 | 0.9982 | 0.9982 | 0.9983 | 0.9984 | 0.9984 | 0.9985 | 0.9985 | 0.9986 | 0.9986 |
| 3.0 | 0.9987 | 0.9987 | 0.9987 | 0.9988 | 0.9988 | 0.9989 | 0.9989 | 0.9989 | 0.9990 | 0.9990 |
| 3.1 | 0.9990 | 0.9991 | 0.9991 | 0.9991 | 0.9992 | 0.9992 | 0.9992 | 0.9992 | 0.9993 | 0.9993 |
| 3.2 | 0.9993 | 0.9993 | 0.9994 | 0.9994 | 0.9994 | 0.9994 | 0.9994 | 0.9995 | 0.9995 | 0.9995 |
| 3.3 | 0.9995 | 0.9995 | 0.9995 | 0.9996 | 0.9996 | 0.9996 | 0.9996 | 0.9996 | 0.9996 | 0.9997 |
| 3.4 | 0.9997 | 0.9997 | 0.9997 | 0.9997 | 0.9997 | 0.9997 | 0.9997 | 0.9997 | 0.9997 | 0.9998 |
| 3.5 | 0.9998 | 0.9998 | 0.9998 | 0.9998 | 0.9998 | 0.9998 | 0.9998 | 0.9998 | 0.9998 | 0.9998 |

Fuente: Villalpando (1985).