

# Estudio climatológico y regionalización de heladas meteorológicas en Uruguay

Trabajo de fin de carrera: Santiago de Mello

Tutora: Dra. Madeleine Renom

Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera

Facultad de Ciencias - Facultad de Ingeniería

Universidad de la República

Uruguay

Diciembre 2013



# Índice general

---

<b>Introducción</b>	<b>v</b>
<b>Objetivos</b>	<b>vii</b>
<b>1. Datos y control de calidad</b>	<b>1</b>
1.1. Datos utilizados . . . . .	2
1.2. Datos faltantes . . . . .	5
1.3. Control de calidad de los datos . . . . .	8
<b>2. Temperatura Mínima</b>	<b>11</b>
2.1. Temperatura Mínima . . . . .	12
2.2. Temperatura Mínima en el s.XX . . . . .	13
2.3. Temperatura mínima en el período: 1950-2009 . . . . .	20
2.4. Variabilidad espacial . . . . .	25
<b>3. Heladas meteorológicas en Uruguay</b>	<b>27</b>
3.1. Definiciones y tipos de heladas . . . . .	28
3.2. Heladas en el siglo XX . . . . .	30
3.3. Heladas 1950 – 2009. . . . .	34

<b>Índice general</b>	<b>III</b>
<b>4. Caracterización de las heladas 1950 -2009</b>	<b>40</b>
4.1. Conceptos previos . . . . .	41
4.2. Cambios en el período de ocurrencia de heladas . . . . .	41
4.3. Persistencia de heladas. . . . .	44
4.4. Intensidad de las heladas . . . . .	46
4.5. Heladas generalizadas . . . . .	50
<b>5. Regionalización de heladas</b>	<b>52</b>
5.1. Técnicas utilizadas . . . . .	53
5.2. Análisis de clúster . . . . .	55
5.3. Análisis de componentes principales . . . . .	56
<b>6. Conclusiones</b>	<b>58</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	59
<b>Referencias</b>	<b>62</b>
	<b>64</b>
<b>A. Anexo I</b>	<b>64</b>
A.1. Datos faltantes . . . . .	65
	<b>71</b>
<b>A. Anexo II</b>	<b>71</b>
A.1. Temperatura mínima 1950 - 2009 . . . . .	72

<b>Índice general</b>	<b>IV</b>
	<b>83</b>
<b>A. Anexo III</b>	<b>83</b>
A.1. Heladas 1950 - 2009 . . . . .	84

## Introducción

Las heladas meteorológicas tienen un gran impacto en muchas actividades, como ser la agricultura, la ganadería y el sector energético, así como sobre la salud de la población. En nuestro país en particular, la economía está fuertemente vinculada a estos sectores de producción y el impacto originado por las heladas meteorológicas se refleja rápida y directamente en la economía.

En Uruguay, si bien existen antecedentes sobre estudios climatológicos de heladas, estos son pocos y la mayoría bastante antiguos. Se encontraron a modo de ejemplo dos trabajos de H. Orecchia Buró: “El régimen de heladas en la República Oriental del Uruguay”, del año 1961, que se encuentra en los archivos históricos de la Facultad de Agronomía [3], y “Humedad del aire, régimen de heladas” del año 1993 [4]. A su vez se han encontrado artículos publicados en los almanaques del Banco de Seguros del Estado: “Las heladas en el Uruguay” del Ing. Agr. Walter C. Díaz, año 1986 [?], “Las heladas y las viñas en el Uruguay” del Ing. Agr. Héctor F. Lacroix, año 1973 [6]. Recientemente, el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria del Uruguay (INIA) publicó una “Caracterización Climática de Uruguay” para el período 1980 – 2009 [5], donde se correlacionan las heladas meteorológicas y las agrometeorológicas. Este informe se basa en pocos puntos, a pesar de lo cual las conclusiones se extienden a todas las estaciones del país. Cabe destacar que no se encontraron trabajos locales publicados en revistas internacionales arbitradas.

Este trabajo pretende realizar un análisis climático riguroso sobre la variabilidad espacial y temporal de las heladas. Sería de gran importancia para el país determinar las características climáticas de estos eventos, como ser su variabilidad temporal, frecuencia, intensidad y períodos del año en que ocurren, así como lograr una regionalización de los mismos.

Se entiende que este estudio permitirá a instituciones nacionales, que han realizado y realizan estudios en esta línea de trabajo, poder contar con una visión global de

heladas en el país y que por su naturaleza realizan estudios aplicados a un cultivo en particular.

## Objetivos

El trabajo busca como objetivos generales comprender aspectos climáticos de las heladas meteorológicas en Uruguay y responder preguntas como: ¿cuál es el período en que ocurren?, ¿son más o menos frecuentes las heladas en nuestro país?, ¿la intensidad y persistencia de las heladas ha cambiado?, ¿cómo es el comportamiento espacial de los eventos?

Otro aspecto que nos resulta de interés analizar es si se ven reflejadas las variaciones y tendencias de las temperaturas mínimas en las características que se mencionaron anteriormente.

El último aspecto que entendemos relevante y muy útil es estudiar la existencia de regiones del país que son espacialmente homogéneas, principalmente en cuanto a la ocurrencia de heladas.

---

1

Datos y control de calidad

---

## 1.1. Datos utilizados

Para este trabajo se utilizaron datos de Temperatura Mínima ( $T_n$ ) diaria de once estaciones meteorológicas de Uruguay. El criterio para seleccionar las estaciones se basa en la necesidad de contar con series extensas, digitalizadas y con la mayor información y calidad que sea posible. De dichas estaciones meteorológicas, diez son estaciones meteorológicas pertenecientes a la Dirección Nacional de Meteorología (DNM) y la restante pertenece al Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Estas series, o gran parte de ellas, se generaron a partir del trabajo de doctorado (M. Renom - 2009) [8] y el proyecto CLARIS-LPB 2010.

Las series utilizadas comienzan entre los años 1907-1950 y todas culminan en el 2009. La tabla 1.1 muestra el período de tiempo disponible para cada estación. Algunas de estas series cuentan con registros del orden de cien o más años de datos diarios (Melo, Mercedes, Paso de los Toros, Rivera y Rocha), siendo lo suficientemente largas para realizar estudios climáticos. Carrasco es la serie más corta que se consideró y abarca sesenta años, por lo cual todas las series son adecuadas en este aspecto.

	Código OMM	Ubicación			Período	
		Latitud [°]	Longitud [°]	Altitud [m]	Inicio	fin
Artigas	86330	-30,40	-56,51	120,38	30/01/1937	31/12/2009
Carrasco	86580	-34,83	-56,01	32,88	01/01/1950	31/12/2009
Estanzuela	—	-34,45	-57,84	80	01/01/1931	31/12/2009
Melo	86440	-32,37	-54,19	100,36	01/01/1907	31/12/2009
Mercedes	86490	-33,25	-58,07	17,01	01/01/1910	31/12/2009
Paso de los Toros	86460	-32,8	-56,52	75,48	01/01/1907	31/12/2009
Paysandú	86430	-32,35	-58,04	61,12	01/01/1940	31/12/2009
Prado	86585	-34,86	-56,21	16,27	01/01/1910	31/12/2009
Rivera	83953	-30,9	-55,54	241,94	01/01/1907	31/12/2009
Rocha	86565	-34,49	-54,31	18,16	01/01/1907	31/12/2009
Salto	86360	-31,43	-57,98	41	01/01/1942	31/12/2009

Cuadro 1.1: Estaciones utilizadas.

La distribución geográfica y la densidad de las estaciones también juegan un rol muy importante. Uruguay no cuenta con la distribución espacial que se desearía (figura 1). En los departamentos de Durazno, Florida, Lavalleja, Río Negro, Treinta y Tres, Maldonado, Flores y San José no se consideró ninguna estación meteorológica, principalmente por dos motivos: el largo de las series y la falta de digitalización de los datos. Si bien el INIA cuenta con varias estaciones que por su ubicación serían interesantes para el estudio, estas no fueron consideradas, ya que los registros comienzan sobre la década de los 80. También la DNM cuenta con las estaciones de Colonia y Treinta y Tres, cuyos largos no son un impedimento para el estudio, pero las mismas no se encontraban disponibles.

Los datos históricos de  $T_n$  son obtenidos a partir del termómetro de mínima. Este



Figura 1.1: Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas utilizadas.

se encuentra dentro de la casilla meteorológica a 1,5 metros sobre el césped y bajo los estándares de la OMM [1]. La observación de la  $T_n$  de un día se efectúa a las 9hs local (8hs horario de verano), ya que estos registros son emitidos en el código SYNOP de las 12Z. La medición de la  $T_n$  comprende al período de 24 hs previas a la medición. Los registros con los que se cuentan comienzan a principios de siglo XX y las prácticas meteorológicas han sufrido modificaciones con el correr del tiempo. Muchas veces, el instrumental sufre cambios o reparaciones, aparecen nuevas tecnologías, las casillas son reubicadas, etc. Todos estos factores pueden incidir o verse reflejados en los datos de  $T_n$ .

Rusticuchi - Renom 2008 [9] muestran, en su estudio de homogeneidad de las series, que las estaciones de Mercedes, Paysandú y Paso de los Toros no presentan ningún salto en las series y que, por el contrario, Salto y Carrasco sí presentan un salto en la serie debido a sus posibles reubicaciones. Si bien estos resultados serán tomados en cuenta, se tendrá cuidado, ya que el estudio no fue hecho para el mismo período. Abordar este tema y poder ajustar las series a las heterogeneidades detectadas se enmarcaran dentro de los trabajos a futuro. Entendemos que trabajar en este sentido y que se puedan desarrollar ampliamente este tipo de prácticas enriquecen mucho a

las series y tienen un valor muy relevante sobre los resultados de los estudios. La base de datos con la que se cuenta se puede considerar como buena y aceptable para el trabajo que se pretende desarrollar. Si bien se han señalado aspectos que mejorarían la calidad de la misma, entendemos que tanto el largo de las series como la distribución geográfica no serán un obstáculo para el trabajo, en términos generales. Sin embargo, se debe tener especial cuidado con el análisis de los resultados en aspectos que involucren el largo de las series y la representatividad espacial, ya que pueden condicionarlos. Si comparamos la base de datos con las utilizadas en varios trabajos de la bibliografía, entendemos que no presenta ninguna desventaja, sino que se encuentran en mejores condiciones que las demás en aspectos como ser el largo de las series.

## 1.2. Datos faltantes

Si bien se dispone de series considerablemente largas, se han detectado cantidades significativas de datos faltantes (Renom, 2009). Para comenzar, se cuantificó la cantidad de los mismos para cada estación. Se observaron períodos prolongados de cierre en varias estaciones, por lo cual se procedió a identificar los años en los cuales las estaciones permanecieron cerradas en períodos mayores al 90% de los días del año. La tabla 2 muestra los datos registrados dentro del período de datos, el porcentaje de datos faltantes y períodos de cierre para cada estación meteorológica.

Dentro de las once estaciones se identificaron cuatro con porcentaje de datos faltantes menores a 1%: Carrasco, Estanzuela, Paysandú y Salto, siendo Estanzuela la única que se encuentra totalmente completa. Luego siguen Mercedes con 5,2% y Paso de los Toros con 6,5%. Con una diferencia bien marcada están Rivera y Artigas que superan el 15% debido principalmente a los períodos prolongados de cierre (tabla 1.2).

Estación	Cantidad de registros	% de datos faltantes	Períodos de cierre
Artigas	16105	19,2	1963-1975
Carrasco	15859	0,69	...
La Estanzuela	8767	0,003	...
Melo	4575	12,16	1946; 1952-1954; 1972-1976
Mercedes	2996	5,2	...
P. de los Toros	2446	6,5	1949
Paysandú	12117	0,25	...
Prado	4374	8,97	1971; 1975-1981
Rivera	5903	15,69	1932-1938; 1985-1989
Rocha	4255	11,31	1932-1941
Salto	12864	0,32	...

Cuadro 1.2: Cantidad de datos registrados, % de datos faltantes y período de cierre.

Los períodos de cierre condicionarán varios tipos de estudios, entre ellos la determinación de tendencias dentro de una serie de datos, pues estos estudios requieren series lo más completas posible para validar los resultados. Por lo tanto, los períodos de cierre condicionarán algunos estudios que se pretenden llevar a cabo.

Este trabajo se centra en el estudio de ocurrencia de heladas. Por lo tanto, si los datos faltantes se concentran en los meses de interés, se podrán ver afectados los resultados. Para estudiar este aspecto, se realizaron gráficos para cada estación meteorológica con la distribución de los datos faltantes dentro del período comprendido entre el 1<sup>o</sup> de enero al 31 de diciembre de cada año. A modo de ejemplo, la figura 1.2 muestra la distribución para la estación Paso de los Toros que comprende el período 1907 - 2009. En este tipo de gráfico queda en evidencia la distribución de los datos

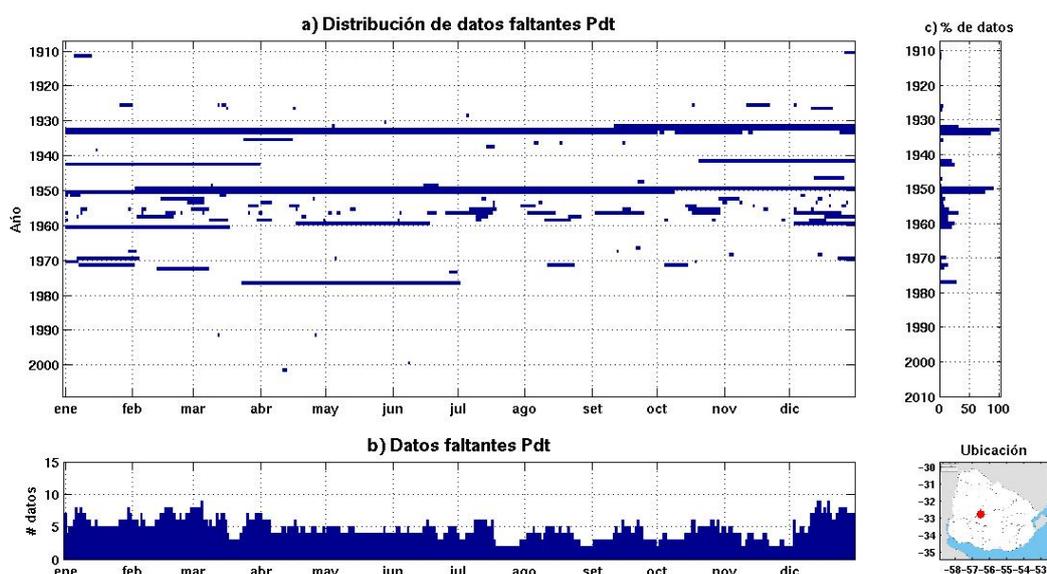


Figura 1.2: a) Distribución de los datos faltantes desde el 1<sup>o</sup> de enero al 31 de diciembre y por año. b) Distribución de los datos faltantes para cada día del año. c) % de datos faltantes por año.

faltantes en conjunto con los períodos de cierre. En el Anexo I se encuentran las figuras análogas para el resto de las estaciones. Un aspecto a destacar son los períodos de cierre que se observan y están cuantificados en la tabla 1.2. Artigas es la estación que tiene el período de cierre más prolongado, llegando a estar sin registros por doce años. Luego sigue Rocha con nueve años, Rivera con once años divididos en dos períodos y por último Melo con siete años en tres períodos. En tanto a la distribución de los datos faltantes, nos interesa ver si existen meses en los cuales los datos faltantes se concentren. En términos generales, se observa que la distribución es homogénea para todas las estaciones, salvo Mercedes que concentra en los meses de agosto y setiembre una cantidad levemente mayor de datos faltantes con respecto al resto de los meses. Cabe destacar que, si bien es importante el porcentaje de datos faltantes para algunas estaciones, la distribución de los mismos no presenta inconvenientes adicionales.

## 1.3. Control de calidad de los datos

Si bien la base de datos posee en su historial controles de calidad, se deben realizar nuevos controles cada vez que se extiende, se modifica o corrige algún dato, ya que cualquiera de estos factores puede alterar los parámetros estadísticos utilizados en el control de calidad.

El control de calidad se realizó en primera instancia con el programa RclimDex que corre bajo la plataforma R. Este software es de distribución libre y se puede obtener del sitio web <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>. Este software utiliza, además de  $T_n$ , los datos de Temperatura Máxima ( $T_x$ ). De esta manera logra una verificación más completa y se nutre de más información para el control. A modo de ejemplo, el software analiza el comportamiento de la amplitud térmica diaria ( $T_x$  menos  $T_n$ ). Puede ocurrir que el valor de la amplitud térmica sea negativo, es decir que  $T_n$  sea mayor que  $T_x$ , por lo cual, se está frente a un error, pero si solo se considera la serie de  $T_n$ , el valor para ese día se encuentra dentro de valores aceptables y no se estaría identificando como un posible error de  $T_n$  o  $T_x$ . Es por este motivo que, para el control de calidad, se utilizaron conjuntamente las series de  $T_x$  diaria de las estaciones seleccionadas. Por otro lado, el software identifica valores que se alejan más de una cierta cantidad de veces la desviación estándar de la serie. Para el estudio, se consideraron los casos que superan más de 3 veces la desviación estándar tanto de  $T_n$  como de  $T_x$ .

Se detectaron 1087 potenciales errores. Luego de identificados, se procedió a verificar los datos en las planillas digitales y estudiar los casos individualmente. Para cada caso, se comparó el comportamiento en esos días con las estaciones meteorológicas más cercanas, para detectar posibles singularidades espaciales. Se constató si existían comportamientos análogos entre ellas, lo que permite verificar si el error es debido solo a la estación en cuestión o si las series de las estaciones circundantes

tuvieron un comportamiento similar, lo que descarta el posible error. A modo de ejemplo, el día 14 de junio de 1967 se registró el mínimo absoluto de  $T_n$  para la serie de Carrasco con  $-7,4^{\circ}\text{C}$ . Si bien este es un valor atípico para la serie, al observar las demás estaciones se detectó que en dicho día y al día siguiente, varias estaciones meteorológicas alcanzaron su mínimo absoluto (por ej.  $T_n$  de  $-5,8^{\circ}\text{C}$  y  $-5,6^{\circ}\text{C}$  en Rocha y Prado respectivamente), y por lo tanto no es considerada como potencial error.

Los potenciales errores se clasifican en tres grupos. En el primero se incluyen los casos donde, luego de identificados los potenciales errores y ser verificados, no se encontró ninguna irregularidad y por lo tanto quedaron como estaban. El segundo grupo incluye los casos que no concuerdan con las demás estaciones y en los que no se encuentran argumentos suficientes para determinar un cambio, los cuales deben ser verificados en las libretas oficiales de la DNM. Por último, encontramos los casos que sin lugar a dudas corresponden a un error, por ejemplo los casos ya mencionados donde la  $T_n$  supera a la  $T_x$ . En estos, ambos valores son considerados como datos faltantes. La tabla 1.3 muestra los errores detectados.

Posteriormente se realizó un estudio de variación interdiurna de  $T_n$ . Se generó para cada mes y cada estación una serie con los valores de  $T_n$  de todos los años (desde el comienzo al fin de la serie). Luego se calcula la diferencia entre los valores sucesivos de  $T_n$  para un día y el día siguiente, generando la nueva serie de variación interdiurna. Se estudian los casos de la nueva serie cuando estos superan en 3 y 4 veces la desviación estándar de esta nueva serie. Esto se replicó para todos los meses y se confeccionó una nueva lista con datos a verificar utilizando la misma metodología que se aplicó a los datos obtenidos con RclimDex. Se encontró que todos los casos, a excepción de 2, estaban contemplados en el estudio realizado con RclimDex, y los dos casos revisados no presentan ninguna singularidad.

Verificados los datos en las planillas digitales, se obtuvo la tabla 1.3, que muestra para cada estación: 1) la cantidad de casos revisados, 2) los errores que se sugiere

	Total de casos Revisados	Errores a verificar		Cambiados por DF		% datos cambiados	
		Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin
Artigas	45	10	15	9	7	0,06	0,04
Carrasco	79	11	11	9	10	0,06	0,06
Estanzuela	64	0	1	0	0	0	0
Melo	102	17	28	16	17	0,35	0,37
Mercedes	113	23	14	15	12	0,5	0,4
Paysandú	69	14	10	9	10	0,37	0,41
Paso de los Toros	197	44	17	24	17	0,2	0,14
Prado	125	21	23	21	21	0,48	0,48
Rivera	94	4	9	1	5	0,02	0,08
Rocha	138	30	33	27	27	0,63	0,63
Salto	61	7	7	5	5	0,04	0,04

Cuadro 1.3: Casos revisado; errores a verificar; datos cambiados por datos faltantes (DF) y porcentajes de datos cambiados por DF

revisar en las libretas de la DNM y 3) los que se sugiere revisar y quedan como datos faltantes hasta no tener una verificación de los mismos.

Los porcentajes de datos cambiados por datos faltantes son muy bajos y su efecto sobre el total de la serie será mínimo. A su vez, al sumar estos porcentajes con los datos faltantes mostrados en la tabla 1.2, se puede considerar que los efectos son mínimos y no afectarán los estudios. Se tuvo especial cuidado a la hora de realizar las modificaciones, teniendo en cuenta la importancia del dato real y respetando las series originales hasta no tener argumentos suficientes que ameriten los cambios.

---

2

Temperatura Mínima

---

## 2.1. Temperatura Mínima

En esta sección describiremos los aspectos generales de la Temperatura mínima, se abordarán temas relativos al comportamiento general, buscando contextualizar el marco de la variable, dado que esta será el punto de partida para definir las heladas meteorológicas.

Teniendo en cuenta que las series comienzan en distintos años, haremos un breve análisis en este sentido. En la figura 2.1 se muestra la disponibilidad de datos entre los años 1907 y 2009, período que contiene todos los registros de todas las series. Entre estos años se encuentran datos faltantes, que incluyen períodos en los cuales las estaciones no estaban operativas, y casos en los cuales los registros fueron sustituidos por datos faltantes en el control de calidad. De esta figura se pueden identificar las series más largas: Melo, Mercedes, Paso de los Toros, Prado, Rivera y Rocha, que cuentan con aproximadamente 100 años de registros.

Por otro lado, dada la disparidad que presentan en el comienzo las series, queda en evidencia la necesidad de definir un período común de estudio que considere la mayor cantidad de estaciones que sea posible. Este hecho nos permitirá tener una buena representatividad espacial. El período común seleccionado es el comprendido entre los años 1950 – 2009, ya que en 1950 están en funcionamiento todas las estaciones y que las mismas aún siguen operativas. Este período de 60 años cuenta con un largo apropiado, desde el punto de vista estadístico, para ser utilizado en los estudios climáticos que se pretenden desarrollar y obtener resultados estadísticamente robustos. Se tendrá especial cuidado con los períodos de cierre prolongados de las estaciones Artigas, Melo, Prado y Rivera, los cuales ya fueron comentados en la sección 1.3.

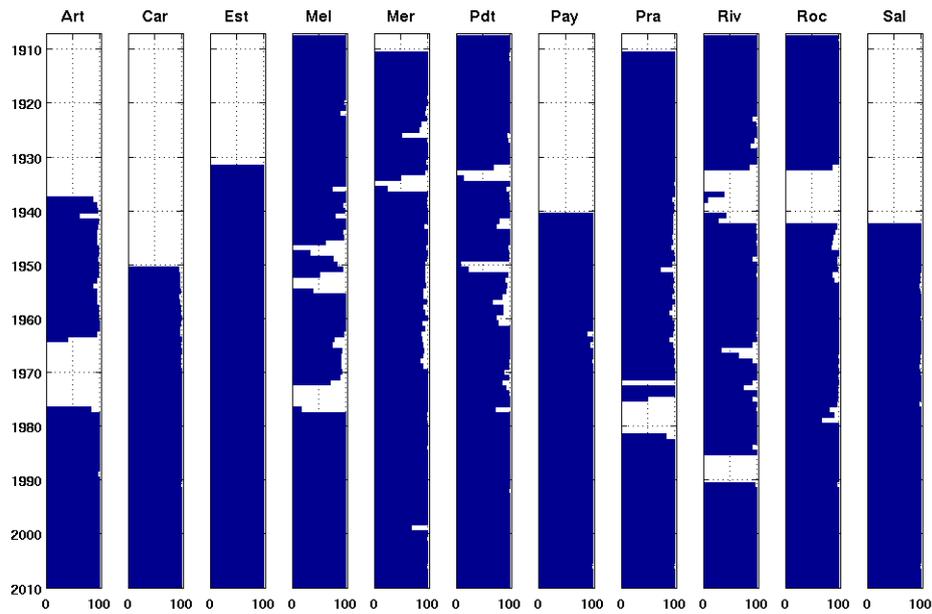


Figura 2.1: Disponibilidad de datos en el período 1907 – 2009 [%]

## 2.2. Temperatura Mínima en el s.XX

De las once estaciones, 6 comienzan a principios del siglo XX, lo que nos permite contar con series que tienen un largo de 100 años, este hecho nos permite explorar y analizar cambios de baja frecuencia si los hubiese. En esta sección se hará un breve análisis en los aspectos generales de las series centenarias.

Lo primero que analizaremos es la estadística básica de la series, comenzando por un análisis a escala mensual. En particular en esta sección se caracterizará el ciclo anual de la  $T_n$ . Si bien la marcha anual de la temperatura es conocida, se comenzó por determinar el comportamiento cuantitativo de  $T_n$ . Para esto se tomó de cada estación todos los registros diarios de  $T_n$  de cada mes y se calculó su promedio y desviación estándar (STD). Para poder visualizar estos datos se generó la figura 2.2 que evidencia un comportamiento muy homogéneo entre las series, tanto en

valores medios como en los de STD mensual. El gráfico muestra el ciclo anual, observándose una leve diferencia entre el descenso de las  $T_n$  en los meses de marzo - junio y el aumento en los meses de agosto - diciembre, donde se marca mayor pendiente (negativa) en otoño a diferencia de una pendiente menor (positiva) en la primavera. La máxima variabilidad mensual ( $5^{\circ}\text{C}$ ) se presenta en los meses de invierno (M-J-J-A), mientras que en los meses de verano la variabilidad disminuye ( $3^{\circ}\text{C}$ ). La variabilidad observada en los meses de invierno se aleja de la idea de que las estaciones de primavera y otoño serían las de mayor variabilidad por ser estaciones intermedias, notando que el comportamiento de  $T_n$  es distinto al comportamiento esperado.

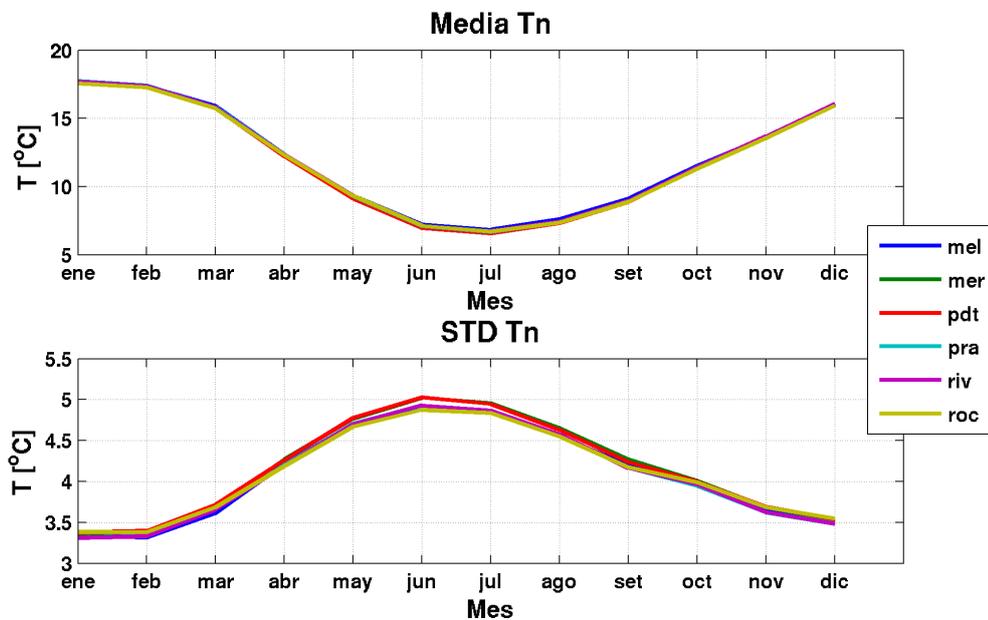


Figure 2.2: Marcha mensual de  $T_n$  media y STD

Dado que se trata de series centenarias, es interesante observar el comportamiento a lo largo de las décadas. Para esto se realizó un gráfico que muestra para cada estación la evolución de las  $T_n$  medias anuales en todo el período (figura 2.3). A la vez, se calcularon los valores medios por década. El cálculo decadal se realizó dejando fuera del estudio a los años que presentaron más de 5% de datos faltantes, ya que se observó que los períodos prolongados sin datos afectaban considerablemente el valor

de la media anual y, como consecuencia, también afectaban el valor de la media decadal. Como ya se mencionó en el capítulo 1.2, se observa que varias décadas son representadas por pocos años, por ejemplo: década del 30 en Rivera y Rocha, década del 70 en Melo, Prado y Rivera en la década del 80. Dejando de lado estos casos, de todas formas se observa que a partir de la década del 70 se mantiene un aumento en las  $T_n$  medias decadales en todas las estaciones, los aumentos encontrados van desde  $0,5^{\circ}\text{C}$  en Paso de los Toros al máximo incremento en Rivera de  $1,3^{\circ}\text{C}$ .

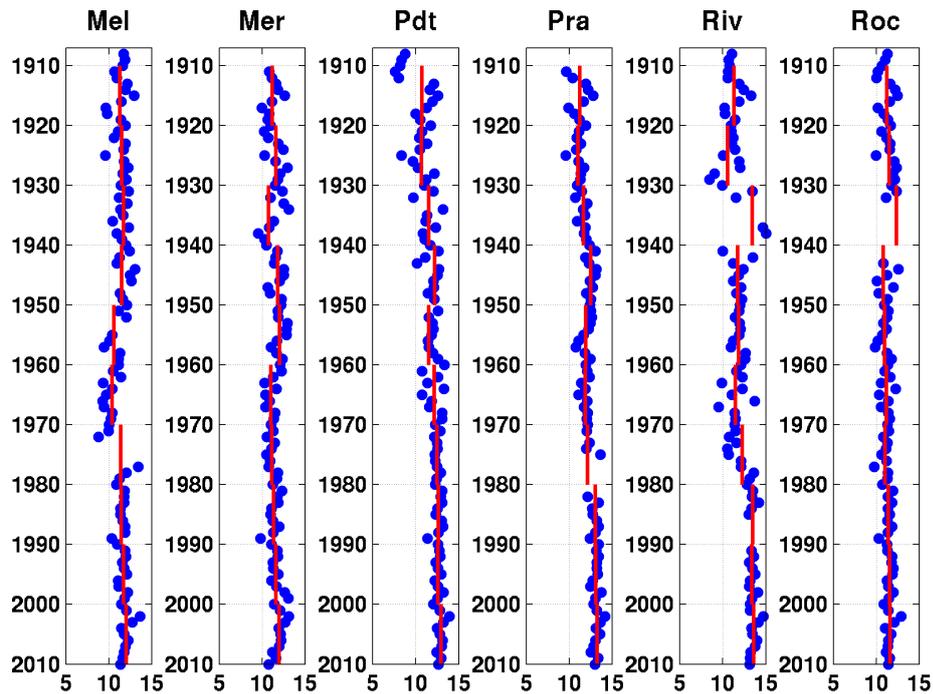


Figura 2.3: Media decadal (línea roja) ; media anual (\* azul).

En el resto de las décadas no se observa un comportamiento claro y homogéneo entre las distintas estaciones en cuanto a las variaciones. Para poder identificar la existencia de algún patrón, se pasó a estudiar el comportamiento en forma conjunta, tomando el promedio de las 6 estaciones para cada década. De esta manera se busca identificar la existencia de algún comportamiento general que englobe a las 6 estaciones. La figura 2.4 muestra que las décadas del 10 y 20 son las más frías con valores medios de  $11,2^{\circ}\text{C}$ . Luego, entre las décadas del 30 y 40, se observa un

aumento de  $0,6^{\circ}\text{C}$  (respecto a las décadas del 10-20). En las décadas de los 50 - 60, los valores mínimos descienden  $0,3^{\circ}\text{C}$ . Finalmente, a partir de la década del 70, se observa un aumento de  $1,0^{\circ}\text{C}$  hasta el fin del período de estudio.

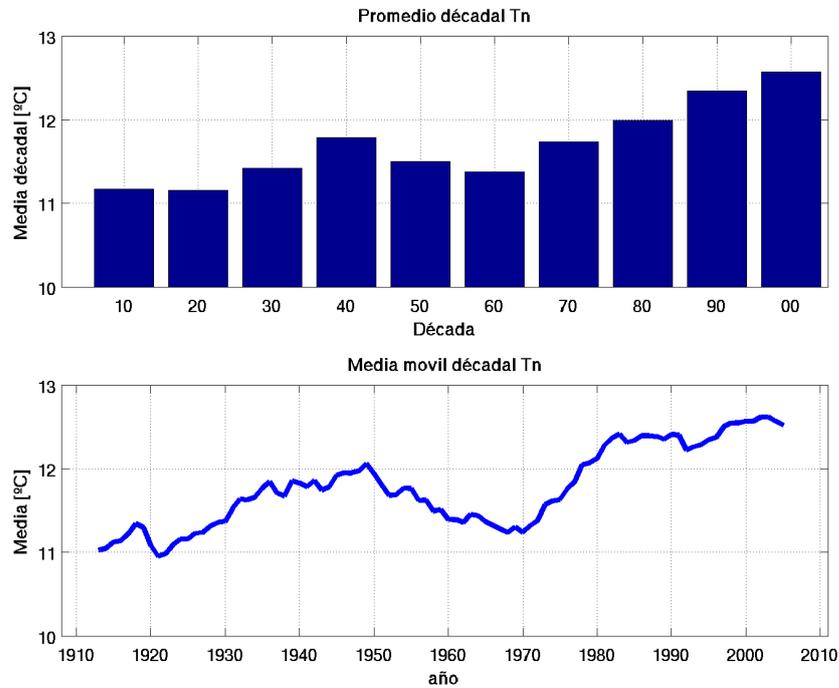


Figura 2.4: Promedio decadal de todas las estaciones (panel superior); media móvil 9 años (panel inferior)

Si bien un estudio separando los datos por décadas nos muestra a grandes rasgos el comportamiento de las series, no es el más apropiado para analizar el comportamiento, dado que de producirse cambios en algún patrón, no tendría por qué estar asociado a una década en particular. En este sentido, y para poder estudiar los patrones de baja frecuencia, se realizó un análisis de media móvil central. Este tipo de análisis filtra las variaciones de alta frecuencia de la serie, dependiendo del largo de la ventana que se tome al considerar los promedios. En este caso se consideró una ventana centrada de 9 años para observar las variaciones decadales de la serie. En el panel inferior de la figura 2.4 se observa una variación decadal marcada que concuerda con el análisis realizado únicamente considerando las décadas. A su vez, de esta manera se evidencia una oscilación decadal de la  $T_n$ , con un ciclo marcado

entre la década del 20 y fines de los 60. A continuación, se observa un segundo ciclo que da la pauta de estar compuesto por una oscilación en conjunto con una tendencia lineal positiva. Este último aspecto muestra claramente un comportamiento distinto que si se considera únicamente el valor de las décadas individualmente.

Ya se han realizado comentarios a escala decadal sobre el comportamiento de las series en forma conjunta. A continuación, nos centraremos en el estudio de la tendencia lineal de cada una de las series. La metodología más apropiada para determinar este tipo de comportamiento es un análisis mediante la utilización de tests estadísticos que lo determinen. Para este trabajo se analizó la tendencia lineal utilizando el test de Sen [10] . El mismo se trata de un test no paramétrico que admite datos faltantes. Este test, en lugar de requerir que la serie sea continua y sin datos faltantes, exige que sea equiespaciada en el tiempo y toma como estimador los valores de la pendiente entre registros sucesivos con datos. El cálculo de las pendientes se obtiene de la siguiente forma:

$$Q = \frac{(x_{i'} - x_i)}{(i' - i)} \quad (2.1)$$

Donde Q es la pendiente entre los puntos  $X_{i'}$  y  $X_i$ , siendo  $i'$  el tiempo después de  $i$ . A partir de esta serie de pendientes se calcula la mediana. Se determina el estadístico Z para una distribución normal al nivel de significancia que se desea. Por último, se estima en función de los datos obtenidos el límite inferior y superior del intervalo de confianza de las pendientes, utilizando el estadístico de Mann Kendall. Si el 0 pertenece al intervalo de confianza al nivel establecido, el test rechaza la hipótesis de la tendencia significativa [tesis\_made]. Dado que el test establece los límites para la pendiente, y con el objetivo de poder visualizar el ajuste, se procedió a realizar un ajuste lineal de los datos. En la figura 2.5 se pueden observar los ajustes las tendencias lineales y la significancia estadística al 5%. Las estaciones de Paso de

los Toros, Prado y Rivera muestran tendencias positivas y significativas. En las 3 estaciones, la pendiente oscila entre 2,6 y 2,8<sup>o</sup>C cada 100 años.

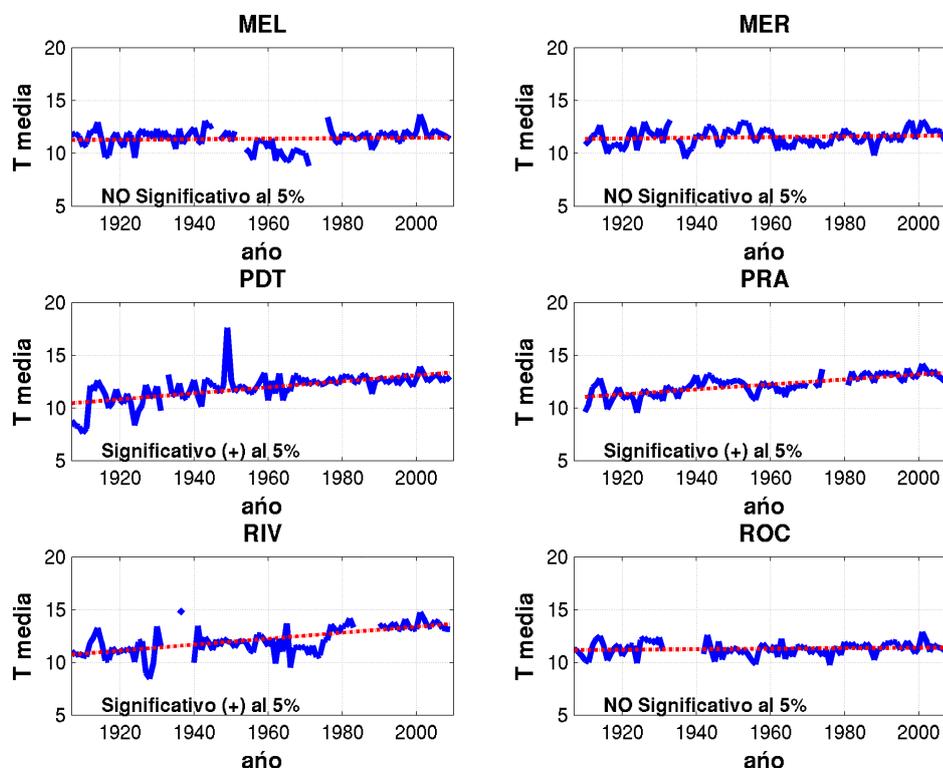


Figura 2.5: Tendencia  $T_n$  período 1907 - 2009

Si bien existen otras técnicas para determinar la variabilidad temporal de las series, no serán incluidas en esta sección, dado que no es el centro de estudio de nuestro trabajo estudiar las  $T_n$ .

Para finalizar el capítulo analizaremos la  $T_n$  a escala diaria. Para esto, se generaron para cada estación gráficos como el mostrado en la figura 2.6. Con estos, se pretende resumir gran parte de la información que se manejó hasta el momento y reflejarla de forma conjunta con los valores de  $T_n$  a escala diaria. La parte a) del gráfico muestra en las abscisas los años en forma decreciente y en la ordenada los días del año sin considerar los 29 de febrero correspondiente a los años bisiestos. Cada celda

representa el valor de  $T_n$  para ese día. Las celdas en blanco son los datos faltantes (ídem cap. 1.2). La parte b) muestra la variación anual de las  $T_n$  (marcas azules) y los valores promedios de la década (líneas rojas), filtrando los años con más de 5% de datos faltantes, de igual modo que en el capítulo anterior. La desviación estándar de cada año es representada en c), y en la parte d) se muestra, para cada mes del año, un diagrama de caja o también conocido como boxplot para los valores  $T_n$ . La línea roja representa el valor de la mediana (Q50). Las cajas azules representan los cuartiles 25 (Q25) y 75 (Q75). Los límites inferiores (superior) se determinan como  $L_{inf} = Q_{25} - 1.5 * [Q_{75} - Q_{25}]$  ( $L_{sup} = Q_{75} + 1.5 * [Q_{75} - Q_{25}]$ ). Por último, los valores que sobrepasan estos límites son considerados como datos atípicos, y están representados con una cruz roja. Cabe destacar que los datos que superan estos límites están contemplados y fueron analizados en el control de calidad de las series (Cap. 1.3).

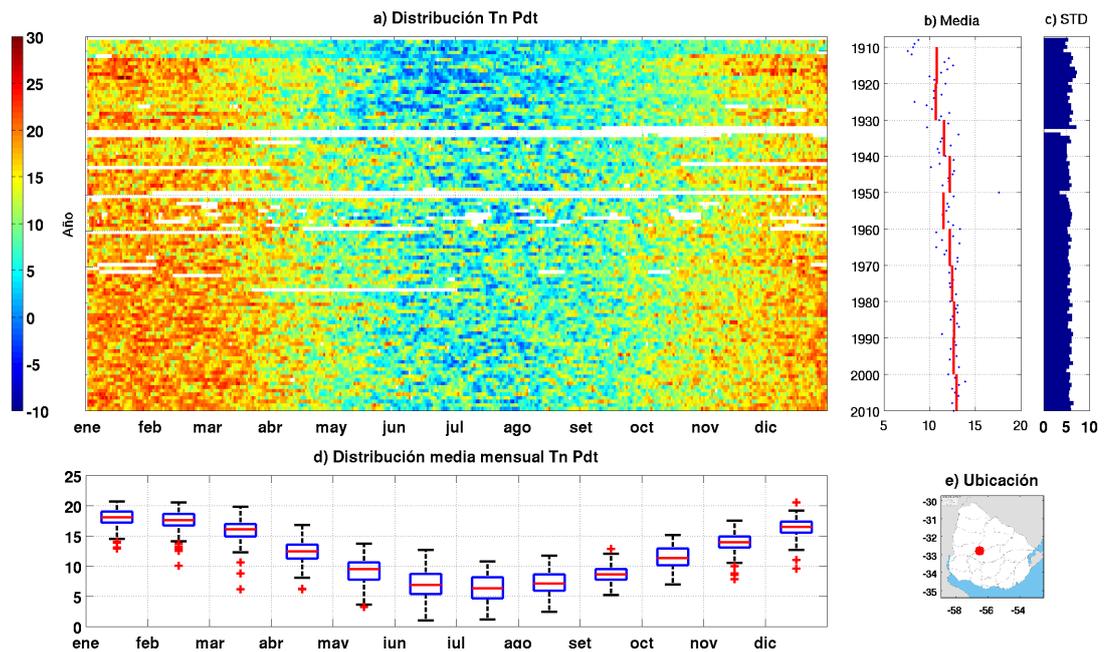


Figura 2.6:  $T_n$  a escala diaria.

Con estos gráficos se puede observar el comportamiento diario de la  $T_n$ , lo que nos permite identificar períodos fríos o cálidos a escala de días. Se observa una mayor cantidad de incursiones de aire cálido en los meses de invierno (Junio a

Agosto). Contrariamente a esto, se observan muy pocos casos de incursiones de aire frío durante los meses de verano (Diciembre - Marzo). Estos eventos (cálidos) presentan una duración entre 3 y 7 días (tonos de rojo) dentro de los meses de invierno, lo cual está en concordancia con lo obtenido en el análisis mensual, donde los meses de invierno presentaban una mayor variabilidad. Los meses de invierno están caracterizados en nuestras latitudes, desde el punto de vista dinámico, por el pasaje de sistemas transitorios de bajas presiones (con sus frentes fríos y cálidos asociados). Este hecho podría estar asociado a las incursiones cálidas anteriormente mencionadas.

### **2.3. Temperatura mínima en el período: 1950-2009**

En este período, como se mencionó al principio del capítulo, analizaremos la totalidad de las estaciones. Si bien al considerar únicamente estos años se pierden muchos datos, se cuenta con más información para observar el comportamiento y la distribución espacial de las series y esto nos permitirá poder observar la existencia, o no, de algún patrón o singularidad en este sentido.

Comenzamos analizando la estadística básica. En la tabla 2.1 se muestran los valores medios de todo el período y la STD para cada serie. Para obtener los valores de  $T_n$  media anual, se utilizó el mismo criterio que el utilizado en la sección 2.2, descartando los años que cumplían con el criterio de tener más de un 5% en la falta de registros anuales. También se muestran los valores de  $T_n$  medias anuales más frías y más cálidas.

En la tabla 2.1 se puede observar que, en términos de valores medios, Artigas es la única serie que presenta un valor que se aleja del resto de las estaciones, con  $13,5^{\circ}\text{C}$ . El resto de las estaciones oscila entre los  $12,5^{\circ}\text{C}$  y  $11,5^{\circ}\text{C}$ . Es importante recordar, a

modo de ejemplo, que el promedio anual de Artigas está calculado sobre una menor cantidad de años. En cuanto a los registros más cálidos, los valores de Tn media anual varían desde 14,9°C a 12,8°C, marcando que existe una diferencia geográfica en los máximos a nivel anual de 2,1°C, con valores más bajos en el sur aumentando hacia el norte. Un aspecto a destacar es que todas las estaciones mostraron como año más cálido al año 2001, hecho que coincide con lo obtenido en Renom 2009, que indica que este año fue cálido debido principalmente a un invierno con valores por encima de lo normal.

Para los registros más fríos de Tn media anual, se observó que no hay una gran diferencia entre las estaciones, tan solo de 1,6°C entre el registro más bajo y el más alto. En cuanto al año de ocurrencia, no existe un año en común tan marcado como en el caso anterior, solamente se repiten dos estaciones en los años 1956 y 1976. Un hecho a destacar es que el último registro de año más frío se dio en Mercedes y que fue en el año 1988.

Estación	Tn media anual mas cálida			Tn media anual mas fría		
	Mean [°C]	STD [°C]	Tn media [°C]	año	Tn media [°C]	año
Artigas	13,5	5,9	14,9	2001	10,5	1976
Carrasco	12,0	5,3	13,6	2001	10,5	1955
La Estanzuela	11,7	5,3	12,8	2001	10,7	1964
Melo	11,2	6,0	13,7	2001	9,2	1965
Mercedes	11,6	6,1	13,1	2001	9,8	1988
P. de los Toros	12,5	5,7	13,9	2001	10,7	1960
Paysandú	12,3	5,8	13,9	2001	9,8	1956
Prado	12,6	5,2	14,2	2001	10,8	1956
Rivera	12,6	5,5	14,7	2001	9,9	1962
Rocha	11,3	5,5	12,9	2001	9,7	1976
Salto	12,7	5,9	14,4	2001	10,3	1956

Cuadro 2.1: Temperatura media anual, STD anual y registros mas fríos.

En cuanto a la marcha anual, se realizaron estudios análogos a los realizados en la sección 2.2, mostrando los mismos resultados a excepción de la estación de Artigas. Se observa que Artigas, en cuanto a valores en la marcha anual, está por encima del resto de las estaciones en  $1^{\circ}\text{C}$  en promedio. Los valores de STD presentan un alejamiento por encima del resto de las estaciones, entre los meses de mayo y setiembre. Esta diferencia varía de  $0,4^{\circ}\text{C}$  a  $0,8^{\circ}\text{C}$  (figura 2.7). Las demás estaciones presentan un comportamiento similar entre ellas, a la vez que están en concordancia con lo observado en el período 1907 – 2009.

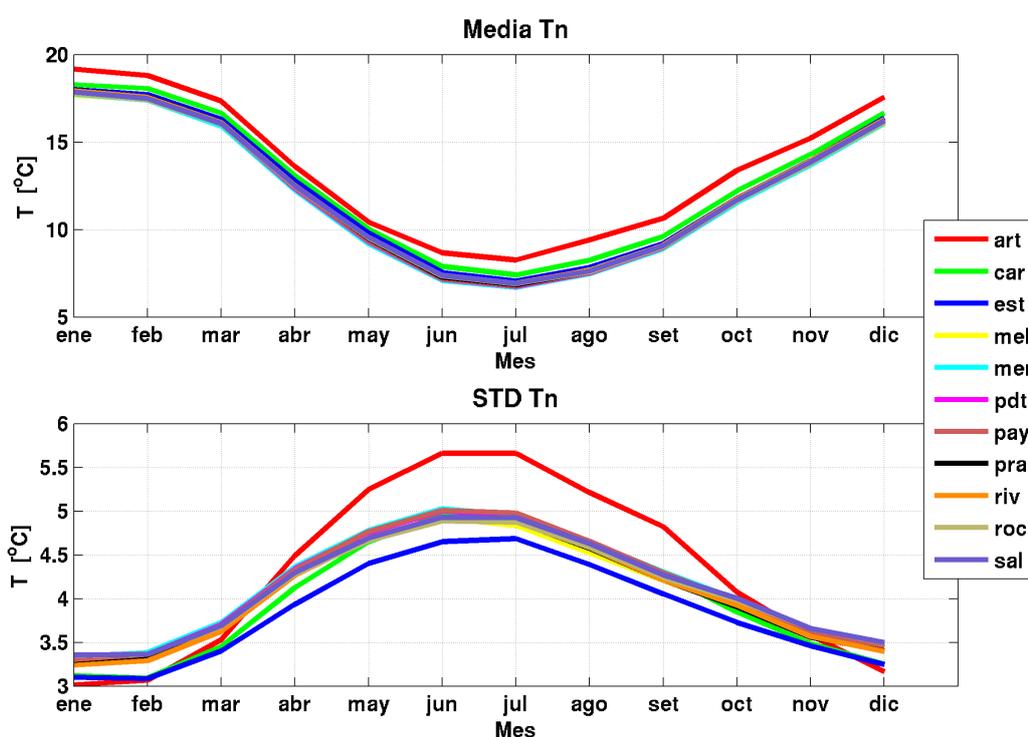


Figura 2.7: Valores por mes de Tn media y STD

Las tendencias lineales fueron calculadas con el mismo criterio que se utilizó en la sección anterior, con niveles de significancia del 5%. La estación de Salto presenta una inhomogeneidad en el año 1976 (Renom, 2009), por lo cual se dejó de lado a la hora de realizar estudios de tendencias con esta serie. Los resultados del test muestran una tendencia positiva y significativa al 5% en todas las estaciones, salvo

Artigas, Mercedes y la Estanzuela (figura 2.8). Si bajamos el nivel de exigencia al 10%, de las tres estaciones solo Artigas marca una significancia estadística al 10%.

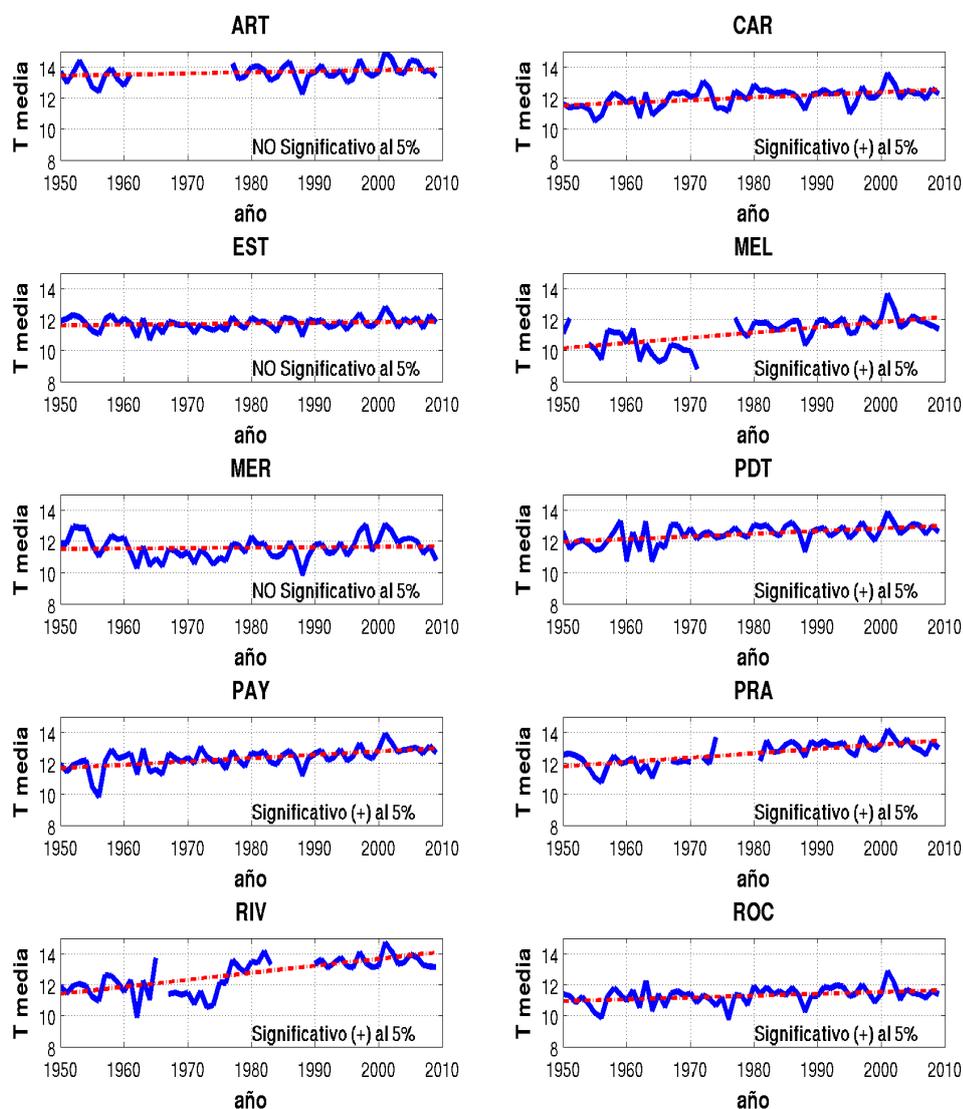


Figura 2.8: Tendencias anuales de cada estación meteorológica

Si bien el test de Sen es el más apropiado para este tipo de análisis, debido a que admite datos faltantes, hay que tener un especial cuidado a la hora de analizar los resultados, dado que se observan, en particular en el caso de Artigas, Melo y Rivera,

que entre los períodos de cierre el ajuste lineal no es representativo de las series.

Al igual que en el capítulo anterior se realizaron gráficos a escala diaria con el mismo formato. Del análisis de la figura 2.9 y sus análogos (Anexo II) se observa, en términos generales, que las décadas de los 50 y 60 fueron las más frías, salvo para las estaciones de Estanzuela, Mercedes, Rivera y Salto. Los valores de STD (parte c) de cada año no presentan variaciones significativas año a año.

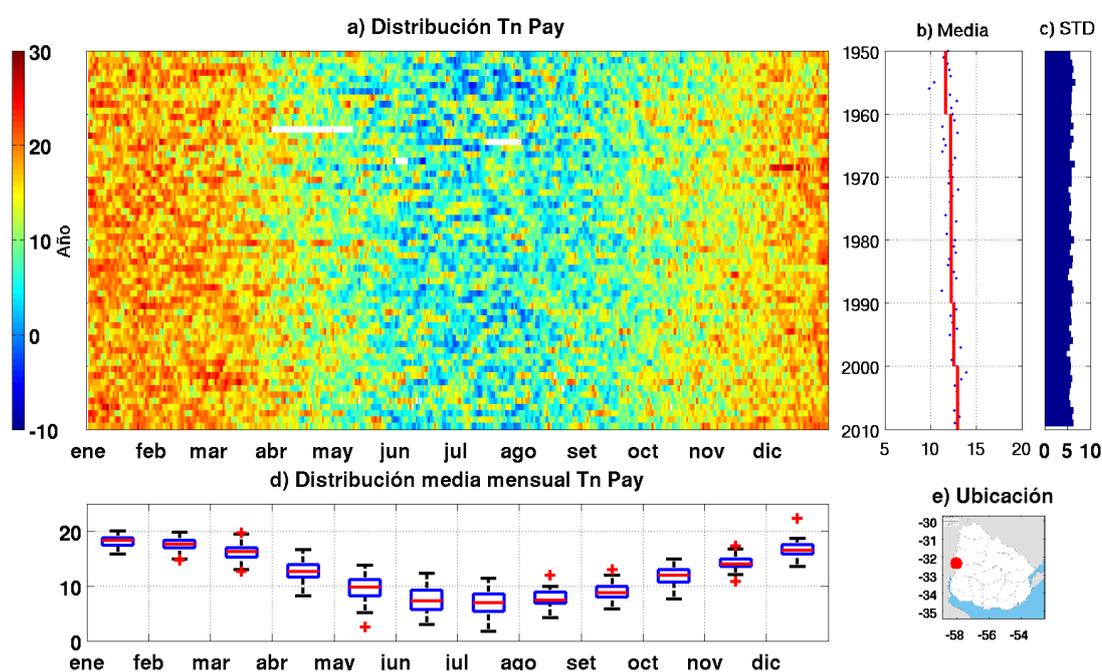


Figura 2.9: Tn escala diarias

Los boxplot confirman lo observado a escala mensual con un mayor detalle, observando el descenso más brusco de la temperatura previo a los meses de junio – julio, y una recuperación más paulatina de las Tn hacia el verano. La mayor variabilidad se encuentra en los meses de junio, julio y agosto, tanto en los percentiles 25 y 75, como también en los límites superior e inferior de los boxplot.

## 2.4. Variabilidad espacial

Con el objetivo de poder representar y realizar un análisis espacial de los valores de  $T_n$ , que nos permitan identificar la existencia o no de regiones con comportamiento homogéneo, se desarrolló un programa bajo la plataforma de Matlab, que nos permite visualizar los datos en todo el territorio del Uruguay (`contour_Uy.m`). Dado que se cuenta con 11 puntos, se procedió a explorar las técnicas más apropiadas de interpolación, resultando como la mejor opción para interpolar los datos el método de Kriging. El método de Kriging es un método de interpolación lineal que pondera los valores más próximos para calcular o predecir el valor en un punto en el cual no hay registro, como muestra la ecuación 2. La característica principal de este método es que utiliza, no solo la distancia entre el predictando y los predictores, sino que también toma en cuenta la ubicación geográfica de los puntos [11].

$$Z(s_0) = \sum k_i Z(s_i) \quad (2.2)$$

Donde  $Z(s_i)$  es el valor de los puntos con datos  $s_i$ ,  $Z(s_0)$  es el valor del punto a predecir (interpolar) en la ubicación  $s_0$ . Y  $k_i$  es una ponderación. Para determinar los valores de  $k_i$  en la ecuación 2.2 para un punto a interpolar, se determina la relación que hay entre los puntos con datos mediante el uso de variogramas y la covarianza. La definición de variograma puede dar una idea del significado que tiene y se define como la media de los cuadrados de las diferencias entre pares de muestras separados por una distancia. De esta manera se está ponderando la distancia entre los puntos y la influencia que tendrán sobre los puntos a predecir o completar. A este valor se lo denomina autocorrelación espacial.

Una de las bondades que tiene este método, es el hecho de que los variogramas contienen la información de cuál es el límite o el alcance que tiene el método espacialmente. Por lo tanto, esta técnica permite, no solo una óptima interpolación o predicción del valor en un punto, sino que además nos agrega la información de qué tan bueno es el valor determinado. Por simplicidad, en nuestro trabajo no incluiremos este hecho en la discusión de los resultados.

Con esta técnica se representaron los datos de valores medios anuales y la STD para todo el período y para cada estación, como se muestra en la figura 2.10. Se puede observar un gradiente en cuanto a los valores medios, que va desde el Sureste del país hacia el Norte, mostrando que el Norte del país presenta su valor más alto en Artigas, con  $13,5^{\circ}\text{C}$ . En el Sur del país, particularmente sobre Montevideo, se observa que la estación Prado marca una diferencia con Carrasco, hecho que marca un aumento local hacia San José. Este comportamiento podría estar asociado con un efecto local debido a la ubicación de Prado, que conjuntamente con el crecimiento de la ciudad se podría asociar a un efecto de isla de calor. Luego se observa un leve gradiente en el litoral del país aumentando hacia el Norte (dejando de lado Mercedes). Los valores de STD muestran un claro comportamiento local, distinguiéndose las estaciones de Melo y Mercedes, lo cual muestra un comportamiento diferente en estas dos estaciones respecto al resto.

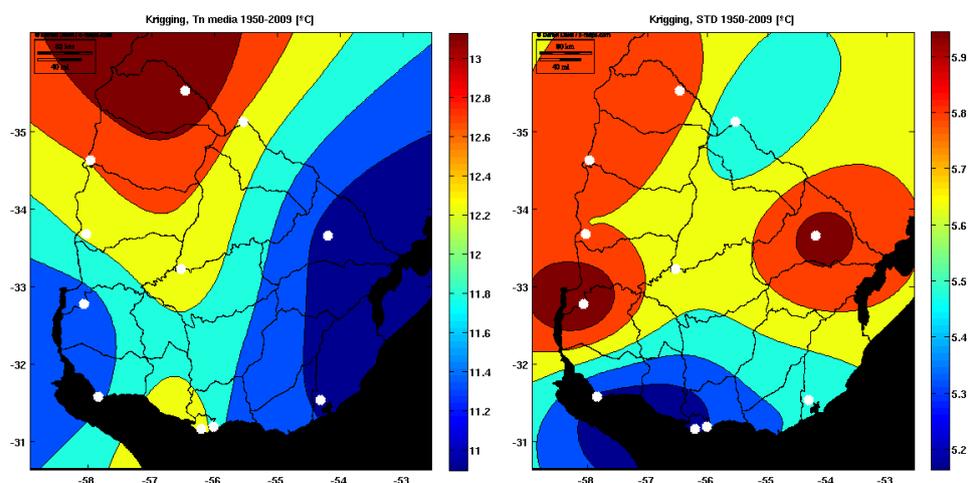


Figura 2.10: Tn media y STD climatológicas.

---

# 3

## Heladas meteorológicas en Uruguay

---

### 3.1. Definiciones y tipos de heladas

El enfoque sobre las heladas es variado. Dependiendo de la formación y la disciplina que aborde a esta temática, se podrán tener varias definiciones y clasificaciones de heladas. Por este motivo, antes de analizar las características de las heladas, nos parece pertinente definir los conceptos de heladas y las principales características que presentan. En el año 2010, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) publica el libro “Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía” [FAO]. Esta publicación cita varios trabajos y hace un recuento de varias definiciones de heladas. A continuación, se tomarán algunas de estas definiciones de heladas:

- “La ocurrencia de una temperatura inferior o igual a 0°C medida en una casilla “tipo Stevenson” a una altura entre 1,25 y 2,0m.”
- “La ocurrencia de una temperatura inferior a 0°C, sin definición del tipo de garita y de la altura.”
- “Cuando la temperatura de la superficie cae por debajo de 0°C; y la existencia de una temperatura del aire baja que causa el daño o la muerte de las plantas, sin importar la formación de hielo.”

De estas definiciones queda clara la diferencia de los distintos enfoques. Por ejemplo, en agrometeorología, la forma más general de definir a las heladas es como el descenso de la temperatura del aire hasta niveles críticos para los cultivos, sin necesidad de llegar a 0°C, existiendo también diferencias en la altura donde se toma el dato de temperatura (por ej.: a nivel de superficie o a 2,0m de altura, etc.).

La ocurrencia de una helada podrá estar influenciada por varios procesos físicos que la determinen. El factor fundamental para que se origine una helada es la pérdida del calor sensible del aire que se encuentra sobre la superficie de la tierra. Los dos factores principales que inciden en esta pérdida son, en primer lugar, un flujo de radiación de onda larga desde la superficie de la tierra hacia la región inferior de la tropósfera, lo que resulta en la llamada comúnmente helada de radiación. El otro factor es la incursión de una masa de aire con una temperatura menor a  $0^{\circ}\text{C}$ , que es comúnmente llamada helada de advección. En muchos casos, la ocurrencia de una helada se debe a una combinación de estos dos factores y es conocida como helada mixta.

En el caso de las heladas de radiación, las características principales que determinan su ocurrencia son, noches con cielo despejado, vientos calmos y la presencia de inversión térmica (gradiente vertical de temperatura positivo). Las heladas de advección se caracterizan, en términos generales, por vientos del orden de  $15\text{Km/h}$  y ausencia de inversión térmica. Las heladas mixtas, en general, ocurren como efecto de una incursión de aire frío sobre una zona cuya temperatura no llega a valores de  $0^{\circ}\text{C}$ , seguida de condiciones favorables para la pérdida de energía por radiación, permitiendo alcanzar valores de temperatura iguales o inferiores a  $0^{\circ}\text{C}$  [2].

Además de la clasificación de heladas en radiativas, advectivas o mixtas, existen en la bibliografía otros tipos de clasificaciones, por ejemplo las heladas tempranas o tardías. Esta clasificación responde a una necesidad del sector agropecuario. De ocurrir una helada en una época de baja probabilidad de ocurrencia, o fuera del período esperado, los impactos que tendrá en el sector productivo pueden ser muy importantes. En esta definición se dejan de lado los procesos físicos, contemplando únicamente la fecha en que ocurren. Más adelante en el transcurso de este capítulo, se definirá el periodo de ocurrencia de heladas.

Por otro lado, a las heladas se las suele distinguir en una subcategoría entre heladas blancas o negras, clasificación que responde a su aspecto visual. La helada blanca

ocurre cuando el vapor de agua se deposita sobre la superficie de las plantas y forma una capa de hielo blanco. En la helada negra, la temperatura desciende por debajo de  $0^{\circ}\text{C}$  y no se forma hielo sobre la superficie, sino que se congela el agua en el interior de las células de la planta.

En esta clasificación, los valores de humedad son importantes. Cuanto más alta sea la humedad, habrá mayor probabilidad de que se deposite hielo sobre la superficie de las plantas. Las heladas negras, por lo general, son las que tienen más impacto sobre la producción, ya que suelen tener registros más bajos de temperatura. Cuando ocurre una helada blanca, el proceso de deposición del hielo libera calor por el cambio de fase, hecho que contribuye a que las mismas no registren temperaturas tan bajas como las denominadas negras. En esta clasificación queda de manifiesto la importancia del valor mínimo alcanzado por la helada, lo cual será tenido en cuenta en el capítulo 4.

Dada la diversidad de las definiciones, es importante establecer la definición de helada que utilizaremos en el trabajo. Definimos como helada meteorológica a los eventos en los cuales la temperatura del aire alcanza valores de  $0^{\circ}\text{C}$  o inferiores, obtenidos a partir de termómetros ubicados dentro de la casilla meteorológica ubicada a 1,5m del suelo. Si los registros son continuos, se puede determinar la cantidad de horas en las que se cumplió esta condición. Cuando los registros son diarios y se cuenta solamente con termómetro de mínima, se identifica como un evento cuando la mínima absoluta es menor o igual a  $0^{\circ}\text{C}$  [1].

## 3.2. Heladas en el siglo XX

Siguiendo con la metodología aplicada para las  $T_n$  en las series más largas, comenzaremos con una descripción de los aspectos generales que presentan las 6 series

más largas en cuanto a la ocurrencia de heladas meteorológicas. En la tabla 3.1, se muestra: el registro alcanzado de temperatura más baja de toda la serie y su fecha; el promedio de la cantidad de heladas registradas en cada estación por año y el valor medio de las  $T_n$  alcanzadas en las heladas registradas, como un indicador primario de la intensidad. Se muestra también la fecha de la primer helada registrada en cada serie y la última (heladas tardía y temprana absoluta de la serie), para poder tener un indicativo del período de ocurrencia de heladas.

Estación	Promedio de heladas por año [días]	$T_n$ media de heladas [ $^{\circ}$ C]	Registro mas frío [ $^{\circ}$ C]	Fecha	Primer helada registrada	Ultima helada registrada
Melo	11,1	-1,7	-11	14/06/1967	19/03/1965	01/11/1964
Mercedes	10,85	-1,12	-8	09/08/1993	15/04/2008	19/10/1946
P. de los Toros	8,94	-1,29	-5	17/06/1907	10/05/1956	26/09/1957
Rivera	5,18	-0,86	-5,4	10/07/1918	03/04/1962	18/09/1951
Rocha	5,39	-0,99	-5,8	15/06/1967	01/05/1976	07/10/1969
Prado	3,29	-0,97	-5,6	15/06/1967	14/05/1926	12/10/1911

Cuadro 3.1: Promedio de días con heladas al año,  $T_n$  media de las heladas ocurridas, registro mas frío y fecha , primer y última helada.

El registro más frío ocurrió en la estación de Melo el 14 de junio del año 1967 con un mínimo de  $-11,0^{\circ}$ C. Con diferencia de un día, este evento fue registrado también en las estaciones Prado y Rocha, considerándose como el evento más frío del período de registros. Este es el evento más destacado dentro de las series por sus valores mínimos, concordando con resultados obtenidos para Argentina y Brasil [Más \_intensa].

El promedio en la cantidad de heladas registradas por año muestra valores entre 11,1 (Melo) y 3,3 días (Prado), mostrando que existe una gran variación en la cantidad de ocurrencias de heladas por año según la serie considerada. La temperatura media de

los eventos de heladas es cercano a  $-1,0^{\circ}\text{C}$  y muestra un comportamiento homogéneo a excepción de Melo que presenta  $-1,7^{\circ}\text{C}$ .

Cuantificar la cantidad de heladas por estación no sería un buen indicador, dado que existen disparidades en cuanto a la cantidad de datos, pero el registro máximo de cantidad de heladas en un año puede ser un indicador en este sentido. La estación que presenta el máximo de ocurrencia de heladas en un año es Mercedes con 38 registros en el año 1989, siguiendo muy próximas Paso de los Toros y Melo con 37 y 36 respectivamente (en distintos años). Quedan más alejadas Rivera (26), Prado (20) y Rocha (19). La única coincidencia en cuanto al año de ocurrencia se da en las estaciones de Prado y Pasos de los Toros en el año 1925.

El período de ocurrencia de heladas es importante principalmente desde el punto de vista agropecuario: Una helada en los meses de abril u octubre no tendrán el mismo impacto que heladas en el período junio - agosto. En este trabajo consideraremos como período de heladas al comprendido entre el primer y último evento registrado en cualquier año dentro de la serie y se define para cada estación. En este sentido, se determinó para cada estación la primer y última helada ocurrida (figura 3.1). En esta figura queda en evidencia una disparidad en cuanto al período de heladas. La estación Melo muestra el período más largo, con un total de 228 días mientras que Paso de los Toros muestra el más corto con 140 días, cuantificando la disparidad mencionada en casi tres meses de diferencia (88 días). El período que tienen en común todas las estaciones es el comprendido entre el 15 de mayo y el 2 de setiembre, con un total de 110 días.

Al considerar en forma conjunta el registro máximo de heladas por año y el período de ocurrencia de heladas, se observa que la estación de Paso de los Toros es una estación que pese a tener un período corto de heladas se encuentra en el segundo lugar en cuanto al máximo de heladas por año. Esto marca a priori que la cantidad de heladas por año y el período de ocurrencia no están ligados linealmente.

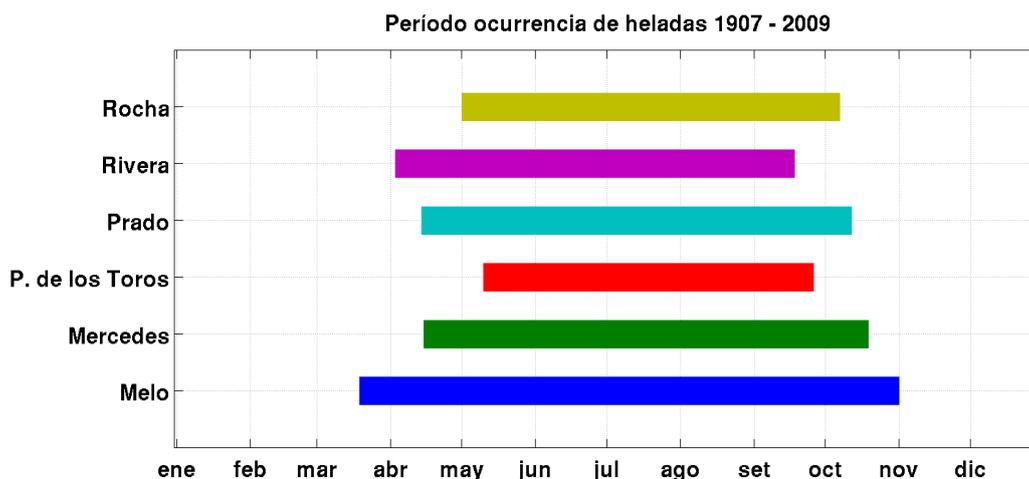


Figura 3.1: Período de ocurrencia de heladas 1907 - 2007

A continuación, haremos un análisis sobre la tendencia lineal en la ocurrencia de heladas que presentan las series. Para este estudio se utilizó la misma metodología en el cálculo de la tendencia lineal utilizado para las  $T_n$  medias anuales, primero aplicando el test de Sen y luego ajustando la recta que mejor aproxima dentro del intervalo que proporciona dicho test. El análisis muestra que las estaciones de Paso de los Toros, Prado y Rivera presentan una tendencia negativa y significativa al 5%. Por otro lado Mercedes presenta una tendencia positiva y también significativa al 5%.

Si se analizan en forma conjunta las tendencias significativas de  $T_n$  obtenidas en la sección 2.2 y de ocurrencia de heladas, se encuentra una concordancia entre la tendencia positiva de las  $T_n$  con la tendencia negativa de la ocurrencia de heladas, hecho esperable pero no constatado hasta el momento en la bibliografía revisada. La tendencia positiva de Mercedes en la ocurrencia de heladas no se puede asociar con el comportamiento que presenta en la  $T_n$ , dado que el ajuste lineal para las  $T_n$  muestra una débil pendiente positiva que no es significativa ni al 10 ni al 5%.

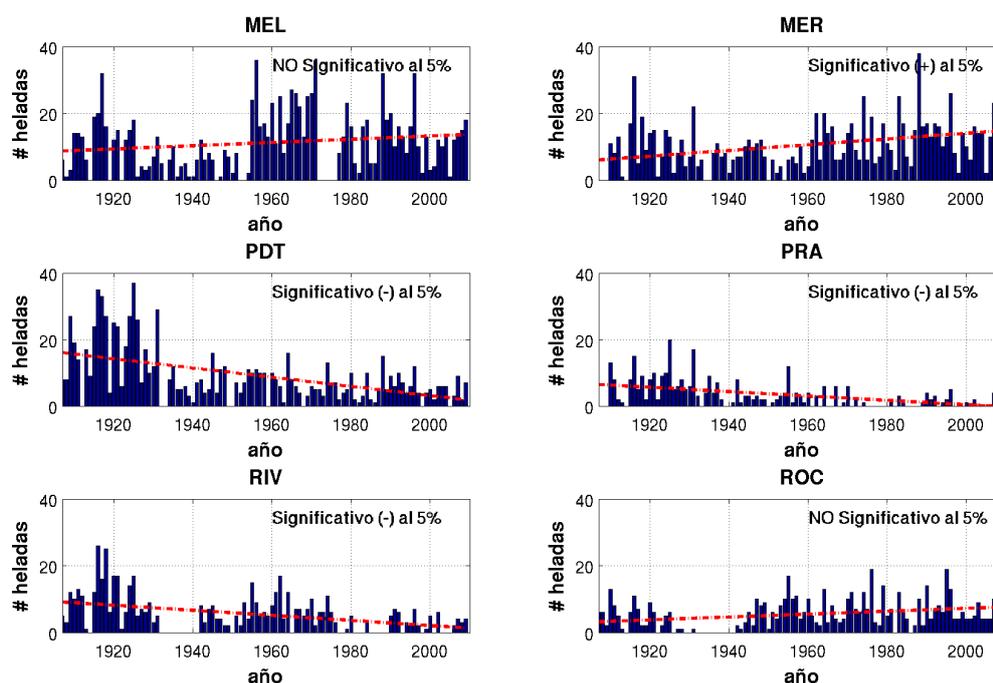


Figura 3.2: Heladas y significancia estadística 1907 - 2009.

### 3.3. Heladas 1950 – 2009.

Al igual que con las series más largas, se generó una tabla con la estadística básica (tabla 3.2). En esta, cambian los valores tanto de la cantidad de heladas como del promedio de heladas por año, pero no de manera significativa. Se resaltan en la tabla los valores que se actualizaron con respecto al período más largo.

Al incorporar más estaciones y acortar el período, se observa que el evento del 14 y 15 de junio de 1967 fue registrado por 8 estaciones como el evento más frío del período, con una persistencia de aproximadamente 4 días consecutivos con temperaturas por debajo de  $-4,0^{\circ}\text{C}$ . Cabe aclarar que, de las 3 estaciones restantes, Artigas no dispone de datos en esa fecha, Paso de los Toros registra un valor de  $-3,0^{\circ}\text{C}$  próximo al mínimo absoluto de su serie y Mercedes registró  $-7,9^{\circ}\text{C}$  (cuando su mínimo histórico es  $-8,0^{\circ}\text{C}$ ). Como se mencionó anteriormente, este ha sido el evento más destacado.

En el capítulo 2.3 se analizaron los valores de  $T_n$  media mensual de todas las estaciones encontrando que julio es el mes en promedio mas frío. Sin embargo, la tabla 3.2 muestra que los registros de  $T_n$  mas bajos se concentran en el mes de junio y no en julio, en este caso hay que considerar que la mayoría de los casos se deben al evento del 1967. Mas adelante, en el capítulo 4.4 se analizarán la intensidad de las heladas, entendiendo por intensidad el registro alcanzado de  $T_n$ .

Estación	Promedio de heladas por año [Días]	$T_n$ media de heladas [°C]	Registro mas frío [°C]	Fecha	Primer helada registrada	Ultima helada registrada
Artigas	4,5	-1,3	-5,2	10/07/1976	07/05/1962	18/09/1951
Carrasco	3,7	-1,1	-7,4	15/06/1967	10/05/1956	19/09/1979
La Estanzuela	2,21	-0,84	-4,4	14/06/1967	15/05/1984	02/09/1990
Melo	13,3	-1,7	-11	14/06/1967	19/03/1965	01/11/1964
Mercedes	10,85	-1,12	-8	09/08/1993	<b>15/04/2008</b>	<b>17/10/1969</b>
P. de los Toros	5,9	-0,96	<b>-3,6</b>	<b>16/07/1965</b>	10/05/1956	26/09/1957
Paysandú	7,2	-1,2	-6,7	14/06/1967	02/05/1968	19/10/1951
Prado	1,5	-0,94	-5,2	15/06/1967	<b>10/06/1983</b>	<b>09/09/1958</b>
Rivera	4,1	-0,88	<b>-5,4</b>	<b>14/06/1967</b>	03/04/1962	18/09/1951
Rocha	6,9	-1,1	-5,8	15/06/1967	01/05/1976	07/10/1969
Salto	7,7	-1,1	-5,3	14/06/1967	05/05/1971	04/10/1999

Cuadro 3.2: idem cuadro 3.1 para el período 1950 - 2009

Con respecto al período de ocurrencia de heladas, pese a la incorporación de 5 estaciones entre los años 1950 – 2009, se mantiene que Melo engloba a todos los demás períodos. Se observa un cambio importante en la estación de Prado. En esta estación se redujo el período casi a la mitad (de 182 a 92 días). Este cambio reduce el período que engloba a todas las estaciones, que ahora se define desde el 10 de junio al 6 de setiembre (89 días). Esto marca un descenso en este sentido de 11 días.

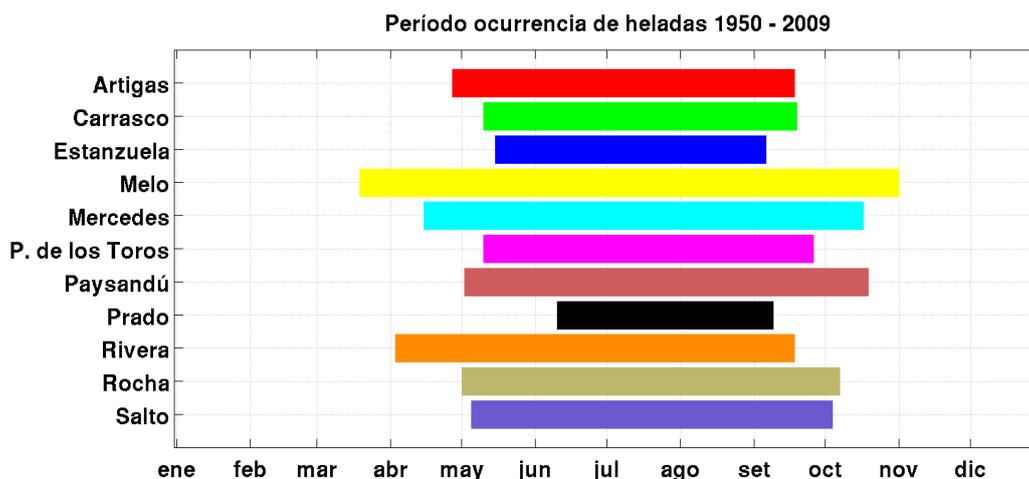


Figura 3.3: Período de ocurrencia de heladas 1950 -2009

A continuación definiremos los meses con mayor probabilidad de ocurrencia de heladas, con el objetivo de poder estudiar el comportamiento en el ciclo anual. Si tomamos los meses en los que hay registradas heladas, el período sería el comprendido entre marzo y octubre, pero en marzo hay registrado un único evento en Melo. Esto, sumado a que se trata de una estación que ha mostrado una mayor variabilidad en las  $T_n$  respecto a las demás, permite considerar como los meses centrales de estudio a los comprendidos entre abril y octubre.

Para estudiar la tendencia lineal en la ocurrencia de heladas, se repitió el procedimiento anteriormente utilizado (test de Sen) y se realizaron los cálculos para el período de ocurrencia de heladas (abril-octubre). Los resultados muestran tendencias significativas, tanto positivas como negativas. Artigas y Mercedes presentan una tendencia significativa positiva al 5%, marcando un aumento en la ocurrencia de heladas. Por lo contrario, Paysandú y Rocha indican una tendencia negativa al mismo umbral. No se encuentra un comportamiento homogéneo en las tendencias.

Conjuntamente, se realizaron los cálculos de tendencia de  $T_n$  para los meses con ocurrencia de heladas, intentando buscar la existencia de algún vínculo entre la tendencia en la ocurrencia de heladas y las  $T_n$ . En la tabla 3.3 se muestran los resultados obtenidos. Se puede observar que las estaciones de Rocha y Paysandú

indican una tendencia negativa entre las heladas y positiva en la  $T_n$  media anual, pero al comparar la tendencia de heladas con la  $T_n$  en los meses de ocurrencia de heladas, se muestra que solo en Paysandú coincide en este sentido. Por otro lado también se observa una tendencia positiva en las heladas para Artigas y Mercedes, en donde Mercedes no presenta ninguna tendencia en la temperatura. La tendencia de Artigas va acompañada de una tendencia positiva en el aumento de  $T_n$ , hechos que van en discordancia. Al analizar las tendencias a escala mensual, se observan pocos meses con tendencia dentro del período de heladas, por lo cual se podría sugerir que la tendencia se debe a los restantes meses cálidos del año. A excepción de Rivera, se observa que los meses de junio y julio no muestran tendencia positiva y significativa en los valores de  $T_n$ .

	# H por año	$T_n$ anual	$T_n$ abr-oct	$T_n$ abr	$T_n$ may	$T_n$ jun	$T_n$ jul	$T_n$ ago	$T_n$ set	$T_n$ oct
Artigas	+	+		+						+
Carrasco		+	+	+				+		+
Estanzuela				+						
Melo		+	+	+	+			+		
Mercedes	+									
P. de los Toros		+		+						+
Paysandú	-	+	+	+				+		+
Prado		+	+	+	+			+	+	+
Rivera		+	+	+		+	+	+	+	+
Rocha	-	+		+						

Table 3.3: Tendencia y significancia estadística al 5% en la ocurrencias de heladas anuales y  $T_n$ , anual, del período abr-oct y por mes de ocurrencia de heladas.

Al discretizar en meses la ocurrencia de heladas, la muestra se reduce considerablemente, no justificando su análisis estadístico. Por este motivo, y para observar como es la evolución, se calculó para cada año la ocurrencia de heladas dentro de cada mes comprendido en el período de ocurrencia de heladas. Los resultados son que en los

meses de Abril y Octubre se observa muy baja ocurrencia de eventos, detectándose principalmente en la región centro del país. En Mayo, se observa que la región sur (Carrasco, Estanzuela, Prado y Rocha) es la que presenta menor (o nula) ocurrencia de heladas, mientras que las estaciones Mercedes y Melo presentan la mayor frecuencia. En setiembre, se observa que las estaciones de la región Centro-Este (Melo, Mercedes y Rocha) son las que tienen una mayor ocurrencia, mientras que en el resto no ha habido casos desde los años 90.

Dado que a escala anual se analizaron las tendencias de heladas para dos períodos, 1907-2009 y 1950-2009, podemos comparar y observar que las tres estaciones que presentan tendencia negativa y significativa en el período más largo (Paso de los Toros, Prado y Rivera), no presentan ninguna significancia estadística en el período 1950-2009. Mercedes mantiene la tendencia positiva y Rocha pasa de no tener tendencia a una tendencia negativa en la ocurrencia de heladas. Si bien no es la metodología más apropiada para comparar períodos de tiempo, dado que uno incluye al otro, se entiende pertinente marcar este comportamiento que deja en manifiesto cambios en las tendencias de heladas. Por otro lado también es importante comparar los promedios en la cantidad de heladas registradas en las tablas 3.1 y 3.2. En estas se observan cambios importantes en Paso de los Toros, disminuyendo en 3 heladas por año y Rivera, con un poco más de 1 helada al año. Rocha y Melo muestran cambios en un aumento del orden de una helada al año.

Pasando a un análisis a escala diaria los eventos de helada, y de manera similar al análisis realizado con las  $T_n$ , se construyeron gráficos que resumen algunos conceptos que se describirán brevemente y luego se tratarán de forma específica en el siguiente capítulo. La figura 3.4 muestra: a) la distribución de datos faltantes en las series; b) la cantidad de heladas por año y la variabilidad decadal (línea roja) obtenida a partir de la media central móvil de 9 años y c) la climatología diaria, tanto en la frecuencia de casos (barra gris) como en la temperatura media de los eventos (barra azul), ambos suavizados con una media móvil de 15 días (en el Anexo III se adjuntan las figuras para el resto de las estaciones).

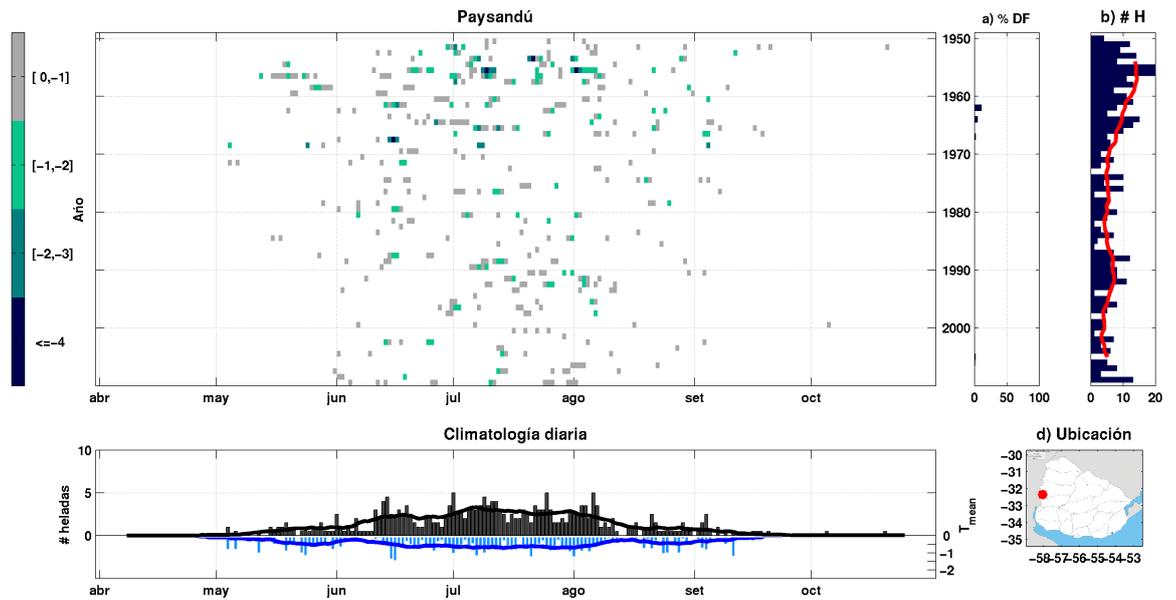


Figura 3.4: Distribución de heladas para Paysandú.

Del análisis en conjunto se puede observar que las primeras décadas (50-70) muestran una mayor frecuencia de eventos, así como una mayor persistencia en los días consecutivos con heladas. El análisis de variabilidad decadal se aplicó únicamente a las estaciones que no presentaban períodos prolongados de cierre. Los resultados muestran que gran parte de las estaciones marcan una variabilidad decadal, a diferencia del estudio de  $T_n$  que no presenta un comportamiento homogéneo en las estaciones en forma individual. Esto sugiere que la variabilidad decadal puede acentuarse en los meses más fríos y reflejarse en las heladas.

---

4

Caracterización de las heladas  
1950 -2009

---

## 4.1. Conceptos previos

En esta sección se pretende profundizar en algunos aspectos específicos del comportamiento de las heladas. Se analizará el período de ocurrencia de heladas desde 2 puntos de vista, primero la variación entre el primer y último día en la ocurrencia de heladas, y luego, en función de parámetros estadísticos, se analizará, no solo la primer y última helada registrada por año, sino que también cómo es la distribución de las heladas en la marcha diaria. Se continuará por un análisis de la cantidad de días consecutivos con heladas o persistencia y se estudiará la intensidad de las heladas y la existencia de alguna vinculación entre la ocurrencia de heladas y la intensidad, entendiendo por intensidad el valor de  $T_n$  alcanzado en cada helada. Por último, se analiza la ocurrencia de heladas generalizadas (HG), siguiendo el criterio adoptado en V. Müller, 2012 [7].

## 4.2. Cambios en el período de ocurrencia de heladas

Como se mencionó anteriormente, el período de ocurrencia de heladas será encarado por dos metodologías, esto responde a que el impacto de las heladas se puede ver desde dos puntos de vista. El primero involucra el hecho de que una helada, en algún período en particular, puede ser crucial para determinar la pérdida por completo de cultivos o cosechas. Esto responde al estado o punto fenológico en que se encuentre la planta en ese período, así como a las características propias de la planta. El otro aspecto responde a que hay cultivos que no son afectados por una única helada. Por lo tanto, el análisis anterior no será de mucha utilidad para este caso, aunque sí lo sería conocer el período en el cual ocurren la mayor cantidad de heladas. Para este

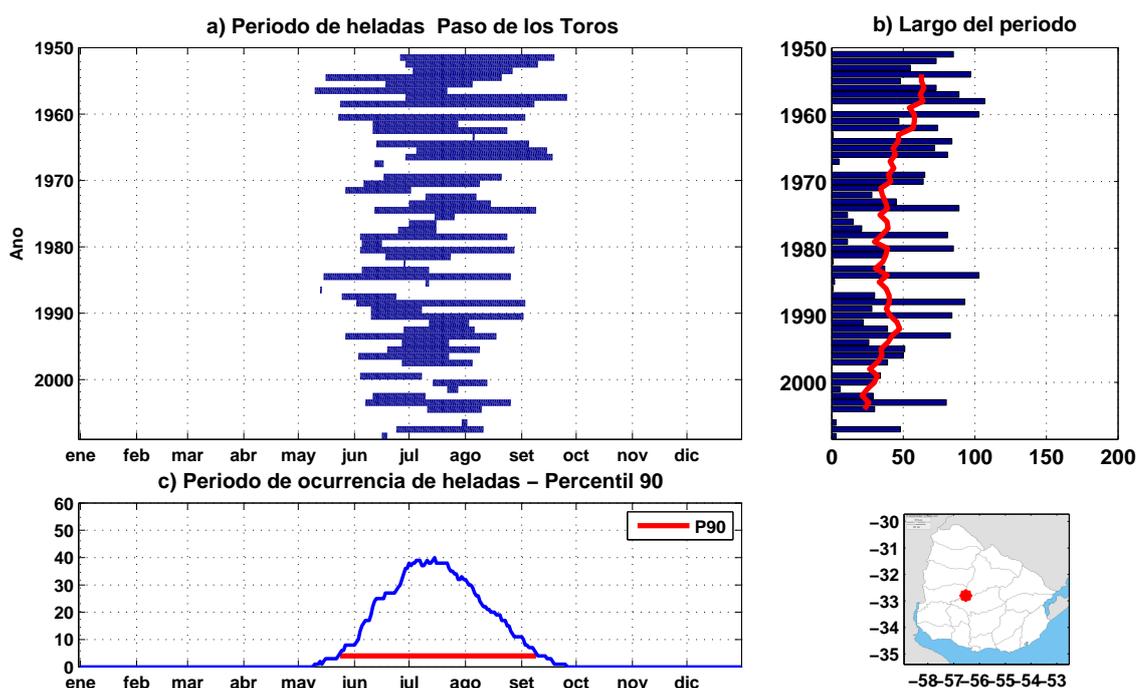


Figura 4.1: Período de ocurrencia de heladas

análisis, la metodología aplicada se basa en estudiar la distribución de las heladas mediante las fechas medias y la STD en que ocurren.

En la figura 4.1 se muestra como ejemplo para la estación Paso de los Toros el período de ocurrencias entre la primer y última helada para cada año (parte a) y la cantidad de días comprendidos entre la primer y ultima helada de cada año (parte b). En la misma figura se marca en rojo la media central móvil de 9 años. Como forma de ver el período de heladas más probable se construyó el acumulado de todos los períodos (parte c), a la vez que se calculó el intervalo que comprende el 90 % de los intervalos anteriores o percentil 90.

Si bien el período de heladas se definió en el capítulo 3, y dado que en varias estaciones el período quedó definido por la ocurrencia de un caso muy aislado, se entiende que esta metodología es muy exigente. Por esta razón, parece razonable considerar como período más probable el intervalo que contiene al 90 % de los períodos. De esta manera, nos aseguramos filtrar los casos más aislados. Con esta metodología, se pueden observar cambios importantes en algunas estaciones. A modo de ejemplo,

Rivera disminuye su período en 66 días, mientras que Prado apenas disminuye en 8 días. El resto de las estaciones disminuye su período en el orden de 30 a 40 días, al considerar este criterio.

En términos generales, se observa que el período de ocurrencia de heladas presentaría una disminución hacia las últimas décadas. Para estudiar este hecho se procedió a calcular la existencia de tendencia lineal mediante el test de Sen. Los resultados muestran que Paysandú, Paso de los Toros, Rivera y Salto tienen una tendencia negativa y significativa, que afirma que el período de ocurrencia de heladas disminuye. La tasa de disminución varía dependiendo de la estación, de 7 días por década (Paysandú) a 4,7 días (Salto). En cuanto a la variabilidad decadal, se observa que las estaciones de Carrasco y Rocha son las que presentan una variabilidad más marcada comparado al resto de las estaciones. En este sentido, se sugiere que la proximidad con el océano puede tener una influencia.

Lo otra metodología empleada sobre el período de ocurrencia de heladas está vinculada con la fecha en la ocurrencia de las heladas y su distribución en la marcha diaria. No solo importa la primer y última helada, sino que importa la fecha o período del año en que ocurren y donde se concentran. El objetivo es poder ver cambios en la variabilidad y si hay corrimientos en el período de ocurrencia. Desde el punto de vista estadístico, los valores que se quieren obtener son el valor medio y los percentiles 10 y 90. Para poder ver estos cambios se tomó una ventana móvil de diez años, que nos permitiera tener una cantidad importante de datos. Luego se realizaron ajustes con distintas distribuciones para ver cuál es la distribución más apropiada. Se utilizaron las funciones Chi-cuadrado, Gama y Gaussiana. Luego de ajustadas, se procedió a calcular las diferencias de errores absolutos entre los valores de la muestra y el ajuste. Obtuvimos como resultado que el ajuste gaussiano es el que presenta un menor error absoluto. Luego, se pasó a realizar el ajuste con la ventana móvil, para así obtener de la distribución el valor medio de los diez años junto con los percentiles 10 y 90. Se graficaron, como se muestra en la figura 4.2, los valores de la fecha media de ocurrencia y los valores del percentil 10 y 90 (parte

a). En la parte b) se muestran los ajustes gaussianos para las distintas décadas. En estas figuras se puede observar los cambios en la variabilidad y en la fecha media de ocurrencia. En Paso de los Toros, se observa una disminución en los percentiles 10 y 90, conjuntamente con un cambio en la fecha media de ocurrencia de heladas, desplazándose hacia agosto en aproximadamente 8 días.

En términos generales, se observa que varias de las estaciones (Paysandú, Prado, Paso de los Toros, Rocha, Estanzuela y Artigas) presentan un corrimiento del valor de ocurrencia medio hacia el mes de agosto, que varía entre 4 y 11 días. Por otro lado, las estaciones de Paysandú, Paso de los Toros y Rivera muestran un estrechamiento entre los valores del percentil 10 y 90 de la fecha de ocurrencia de heladas. El ajuste gaussiano de las figuras muestra en forma conjunta cómo ha sido la evolución de estos parámetros con la ocurrencia de heladas, dado que el área bajo cada gaussiana representa un valor aproximado de la cantidad de heladas ocurridas. Estos gráficos reúnen esta información con la cantidad de heladas, que se ha analizado en el capítulo anterior.

### **4.3. Persistencia de heladas.**

La cantidad de días consecutivos con heladas puede tener grandes consecuencias, no solo para el sector agrícola, sino que también en el sector eléctrico y los servicios de salud. Para este punto se contabilizaron, para cada estación, la cantidad de heladas registradas en días consecutivos. Un período de cuatro días con heladas sucesivas es contabilizado únicamente como un evento de cuatro días y no será contabilizado en los grupos de menor tamaño. Cuantos más días sucesivos se registren, se entenderá que el evento fue más persistente.

La figura 4.3 muestra la cantidad de eventos con heladas consecutivas en cada estación. Se puede observar que, pese al período de cierre, Melo es la estación que

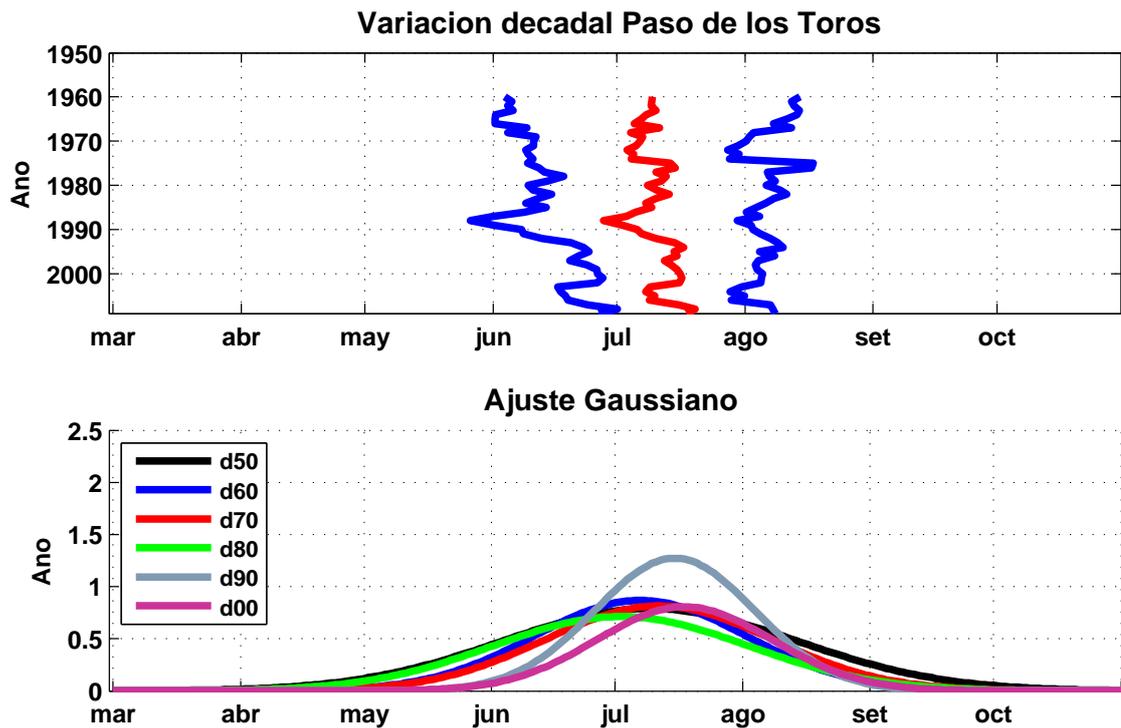


Figura 4.2: Variación decadal de fecha media, P10 y P90; ajuste gaussiano en la ocurrencia de heladas por décadas.

presenta la mayor cantidad de casos, tanto en los eventos de 2 días como también en los más persistentes. Luego siguen Mercedes y Paysandú. Las estaciones que tienen menores persistencias son Rocha, Estanzuela, Prado y Carrasco, todas ellas ubicadas hacia el Sur y sobre la costa. Hay que recalcar que, pese a los períodos de cierre de las estaciones Artigas, Melo y Rivera, estas no se encuentran dentro de las estaciones con menor persistencia. Los registros más persistentes detectados son de 8 días y se dan en las estaciones de Mercedes y Melo.

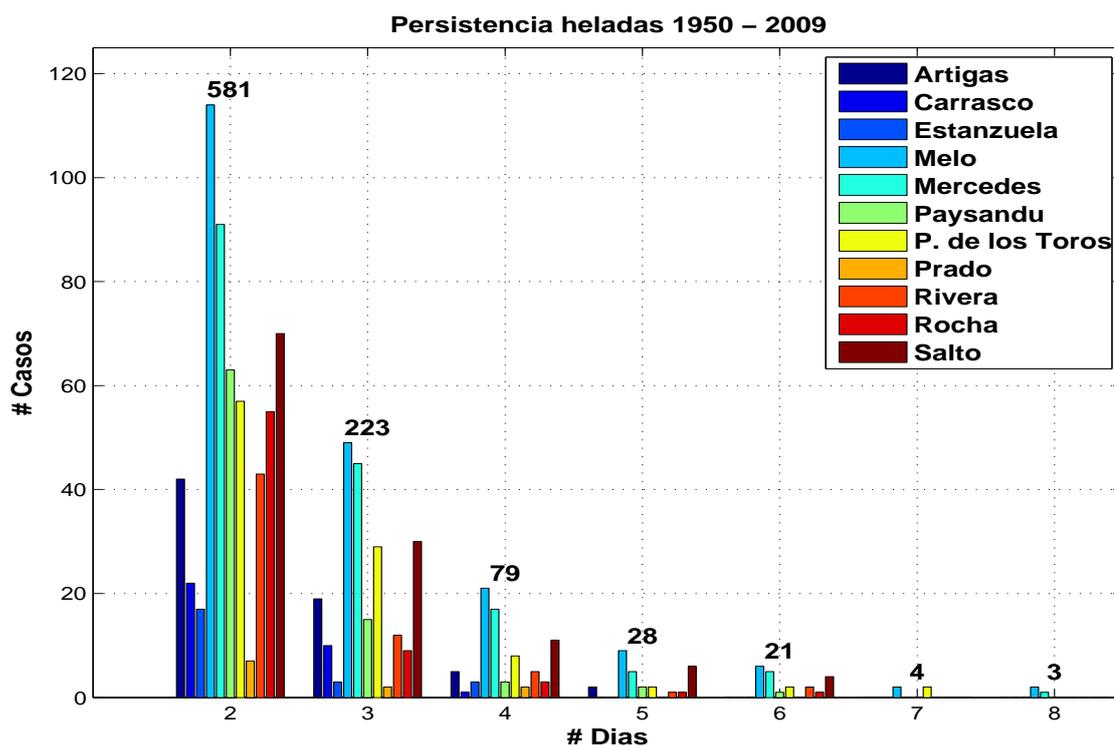


Figura 4.3: Persistencia de las heladas por estación

En la figura 4.4 se discrimina la persistencia de heladas en los meses en que ocurren. Se puede observar una fuerte prevalencia en el mes de julio de las heladas con dos días de persistencia. Los registros de heladas con baja persistencia (2 a 4 días consecutivos) tienen un comportamiento similar a la distribución de las heladas en la marcha diaria. Por este motivo, se entiende que las heladas de baja persistencia no están asociadas ni restringidas a un período en particular. Las heladas más persistentes por otro lado se concentran en los meses de junio, julio y agosto, a excepción de un caso de 6 días en el mes de setiembre en la estación de Salto.

#### 4.4. Intensidad de las heladas

Esta sección profundizará sobre los valores de  $T_n$  registrados en las heladas, entendiendo por intensidad el registro alcanzado de  $T_n$ . En este sentido, los gráficos

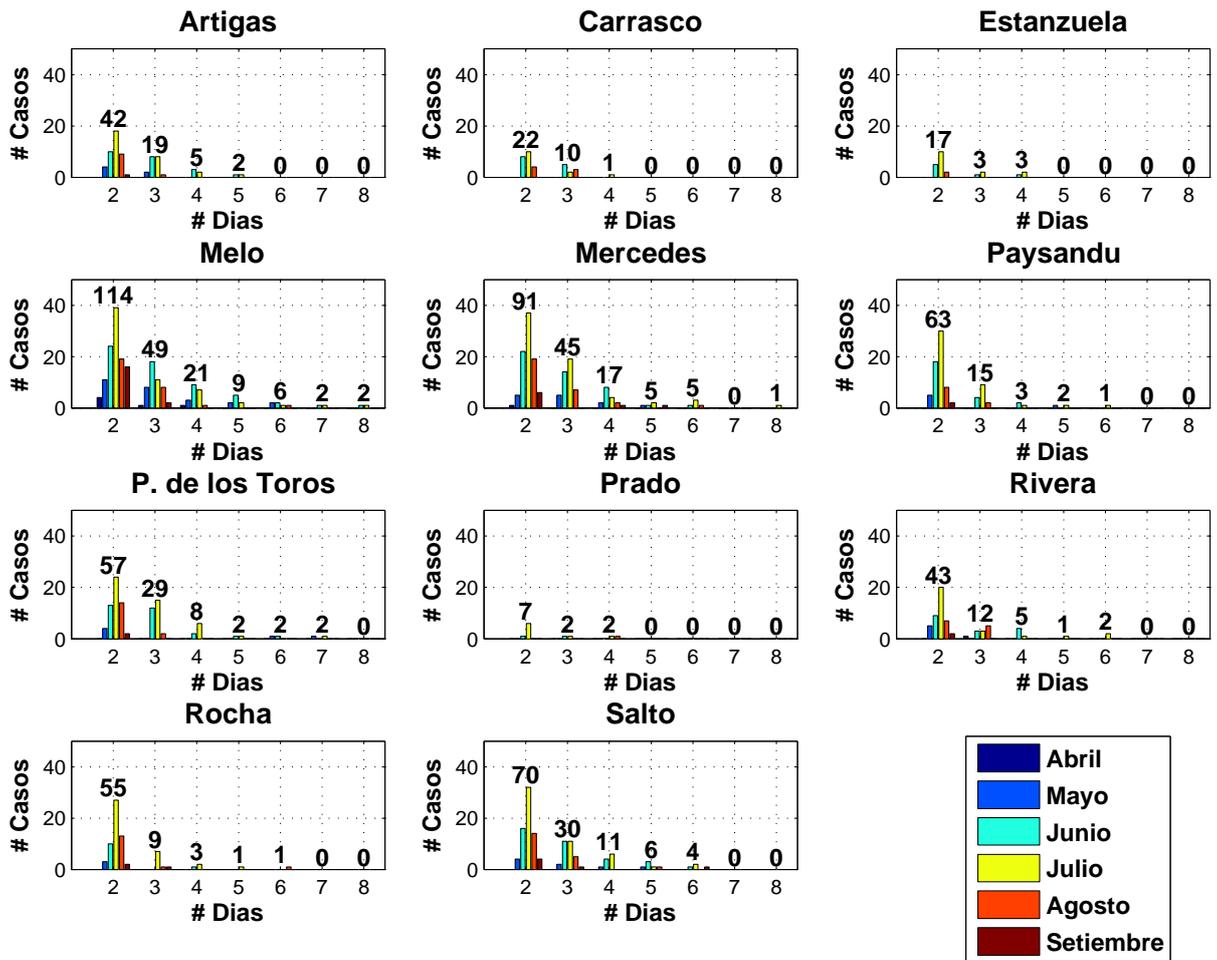


Figura 4.4: Persistencia por mes

presentados en la sección 3.3 son de mucha utilidad y haremos referencia a ellos. En estos se puede observar que la intensidad ha disminuido con el correr de los años en varias estaciones: Estanzuela, Prado, Carrasco, Paysandú, Rivera y Melo. De las restantes estaciones, Rocha y Paso de los Toros presentan una leve disminución pero no muy marcada. Salto y Artigas muestran un leve descenso en las décadas de los 70 y 80, presentando, en los últimos años un aumento en la intensidad. Por último, la estación de Mercedes muestra un aumento en las décadas de los 80-90, aumentando la frecuencia en la ocurrencia en los últimos años, pero no la intensidad.

Para poder cuantificar este hecho, se realizaron gráficos como los que se muestran en la figura 4.5, donde se toma un mes y se muestra para cada década el porcentaje de días con heladas dentro del período seleccionado, distinguiéndose entre los distintos intervalos que van desde 0 a  $-1^{\circ}\text{C}$ ,  $-1$  a  $-2$  y menores a  $-2^{\circ}\text{C}$ . Se optó por tomar el porcentaje para cada mes, dado que la cantidad de valores por década tendrá 300 o 310 valores, lo cual no es apropiado para comparar. En estos gráficos, se puede observar que las heladas con valores inferiores a  $-2^{\circ}\text{C}$ , si bien varían, no presentan un comportamiento homogéneo en su distribución, destacándose que las estaciones que presentan mayor porcentaje de datos inferiores a  $-2^{\circ}\text{C}$  son Mercedes y Melo.

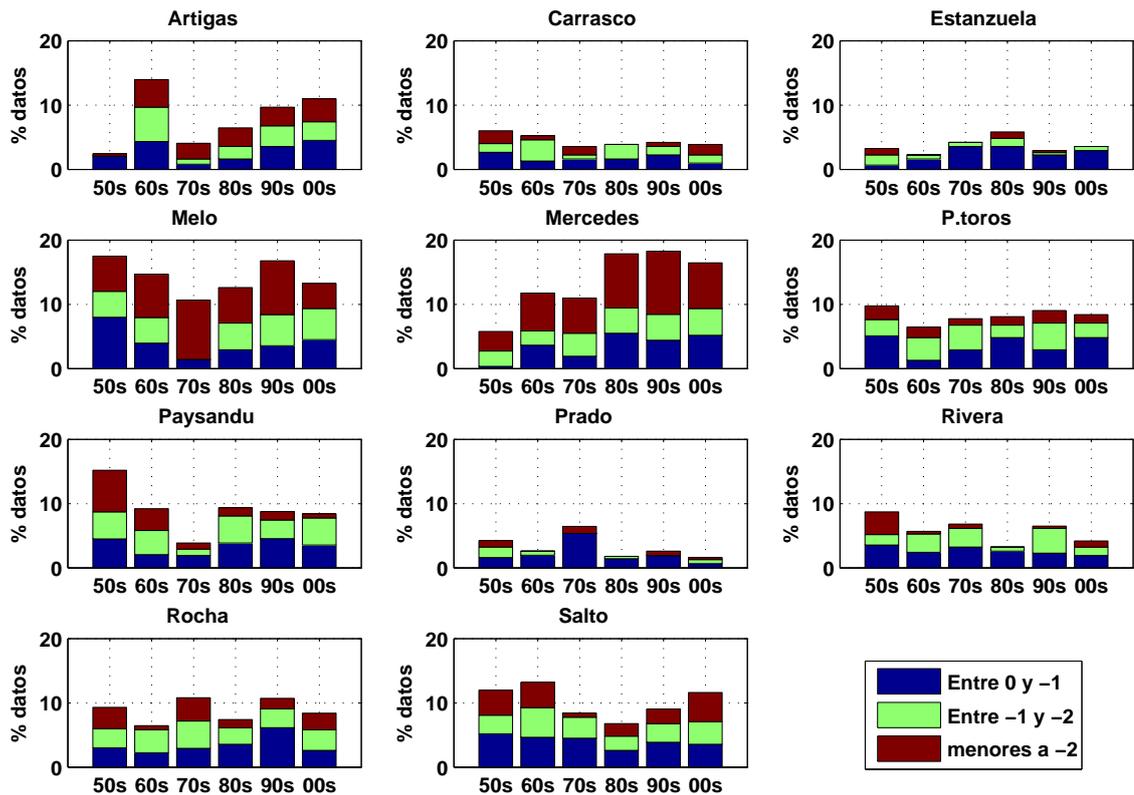


Figura 4.5: Heladas por década discriminados por umbrales para el mes de julio (%)

Un aspecto importante que analizaremos a continuación es la existencia de algún vínculo entre la cantidad e intensidad de las heladas. Al correlacionar la marcha diaria de estas variables, podremos decir, para el caso en que la correlación sea alta, que es probable encontrar heladas más intensas en los meses con mayor cantidad de heladas. En caso de tener una correlación baja, el significado será que la ocurrencia de heladas no está vinculada, pudiendo ocurrir heladas con cualquier intensidad en el período de heladas. Se realizaron los cálculos para el coeficiente de correlación de Pearson, que nos permite saber cuán fuerte es la medida de la relación lineal entre estas dos variables. Para calcular la correlación se seleccionó como medida de la intensidad el valor medio de la  $T_n$  registrada en cada evento y la cantidad de heladas registradas (para cada día de la marcha diaria). Los cálculos muestran una baja correlación, con valores inferiores al 40 %, salvo en 2 estaciones. Esto indica que las heladas intensas pueden ocurrir de forma independiente del período de heladas.

A continuación, se repitió el procedimiento anterior para la ocurrencia de heladas por año en el período 1950-2009 y su respectiva intensidad. Los resultados obtenidos son similares, lo cual nos indica que no se puede asociar heladas más intensas con una mayor ocurrencia de heladas por año.

## 4.5. Heladas generalizadas

Para tener una primera aproximación espacial en la ocurrencia de heladas, se estudiarán las heladas generalizadas (HG). Se definen las HG como heladas que se registraron en varias estaciones el mismo día, siguiendo el criterio de Müller, 2012. En el trabajo citado se definen a las HG como las que ocurren en el 75 % de las estaciones. Este valor, para nuestro estudio, corresponde aproximadamente a 8 puntos, quedando definidas de esta manera las HG como heladas registradas en más de 8 estaciones. Para comenzar a estudiar en esta línea, se realizaron gráficos similares a los mostrados en el capítulo anterior (capítulo 3.3), pero en vez de colocar el valor de la intensidad de las heladas en un día, se marca con colores la cantidad de estaciones en que fueron registradas (figura 4.6).

Se puede observar que las HG se concentran entre el 14 de junio y los primeros días de agosto. Realizado un estudio de tendencias con el test de Sen al 5 % de significancia estadística, quedó determinado que la ocurrencia de HG no presenta tendencias. Lo que se puede observar es una oscilación decadal no muy marcada, la cual podría estar asociada con alguna oscilación de las mencionadas en los capítulos previos. Las HG que abarcan más puntos (ocurridas en más de 9 estaciones), se restringen principalmente al mes de julio, mientras que las HG registradas en las once estaciones se concentran en las dos últimas décadas. Por otro lado, es importante mencionar que se observan eventos de HG con persistencia de 2 días (7 casos), y solamente 3 con persistencia de 3 días. Los eventos de 3 días se dieron en las primeras décadas, ocurriendo dos de estos, en el año 1956 y el otro evento en 1968. En la última

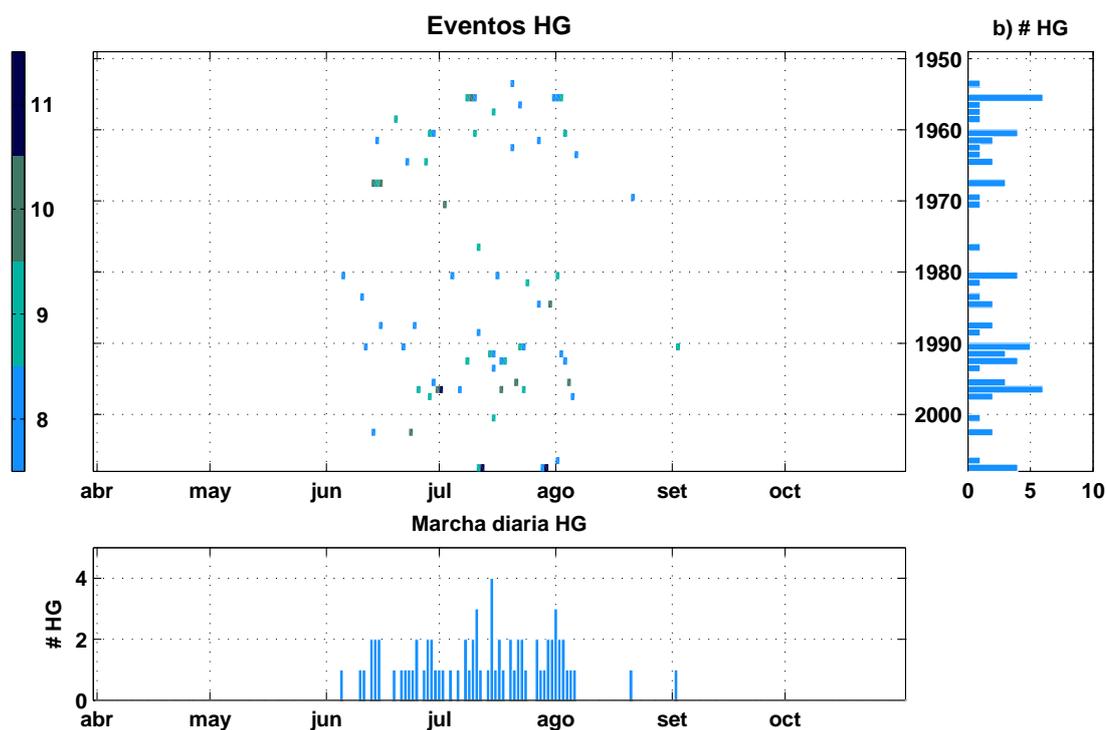


Figura 4.6: Distribución de HG

década, se observa que el año 2009 es el único año en que ocurrieron dos eventos de dos días con HG, siendo este un año recordado por las pérdidas sufridas en el sector agropecuario (comunicado de prensa MGAP, agosto de 2009). Las HG, según nuestro estudio, son eventos que, por la distribución de las estaciones meteorológicas, están asociados a la escala sinóptica. Estos eventos son los más interesantes de estudiar, dado el vínculo espacio-temporal que presentan. En el trabajo Müller, 2012, se realizan algunos estudios de casos de HG y se determinan los posibles procesos dinámicos que dan lugar a este tipo de eventos. En este sentido es que entendemos pertinente realizar a futuro un análisis en cuanto a los patrones de circulación general de la atmósfera que están asociadas a las HG, como así también para los demás índices y caracterizaciones estudiadas anteriormente en este capítulo.

---

# 5

## Regionalización de heladas

---

## 5.1. Técnicas utilizadas

El objetivo de este capítulo es poder desarrollar una metodología que permita identificar regiones de Uruguay con un comportamiento similar en cuanto a algunas características que presentan las heladas. La selección de la variable debe estar directamente ligada a la pregunta que se desea responder, en nuestro caso se desea conocer las zonas que tienen el mismo comportamiento en la ocurrencia de heladas dentro del período de heladas definido en el capítulo 3. La variable que se analizará es la cantidad de heladas ocurridas por mes en el período de heladas.

Las técnicas de regionalización son muy variadas. En particular, se empleará el Análisis de Clúster y Análisis de Componentes Principales (APC). En una segunda instancia, se pretende conocer el comportamiento en conjunto de las zonas regionalizadas, para las cuales podrán definirse índices, los que servirán para analizar la existencia de algún vínculo con los patrones de circulación atmosférica.

El análisis de clúster busca idear de alguna forma un mecanismo para agrupar a las series, buscando que los grupos tengan una homogeneidad en algún sentido. Por lo tanto, no solo se debe medir o cuantificar el criterio de homogeneidad o distancia entre los grupos, sino que se debe establecer el criterio de agrupación que se toma. Este punto es clave, dado que determinará el resultado de la agrupación. Existen varias medidas de la distancia, por ejemplo la distancia euclidiana. En nuestro caso, usaremos la distancia media ponderada, como se define en las ecuaciones 5.1 y 5.2 [12].

$$d(x, y) = \sqrt{\sum w_i (x_i - y_i)^2} \quad (5.1)$$

$$w_i = \frac{1}{s_{i,i}} \quad (5.2)$$

Donde  $x$  e  $y$  son dos estaciones, los subíndices  $i$  indican cada dato de la serie,  $d(x, y)$  es la distancia entre las estaciones,  $w$  es el peso de ponderación y  $s$  es la covarianza de  $x$  e  $y$ . Por último, existen varios criterios distintos para determinar la forma de agrupar. En este caso se adoptó el método conocido como Linkage simple, que agrupa en función de la mínima distancia. De esta manera, se lograrán agrupaciones que compartan mayoritariamente el ciclo anual de las heladas.

La otra metodología que se utiliza para regionalizar es el estudio de ACP, esta técnica permite analizar de forma conjunta la covariabilidad de las series. El análisis de componentes principales, determina un conjunto de funciones ortogonales empíricas (EOF, por sus siglas en inglés), que son estructuras espaciales de la matriz de correlación y los componentes principales (CP). Estos últimos muestran cómo han variado las EOF en el tiempo. La expresión matemática que resume a esta descomposición es la siguiente:

$$X(x, y, t) = \sum CP(t).EOF(x, y) \quad (5.3)$$

Donde  $X$  es la serie de datos para cada estación,  $(x, y)$  identifica a una estación. Cada uno de los CP y EOF explica un porcentaje de varianza de las series originales, tanto en la variabilidad espacial (EOF) como en la temporal (CP).

## 5.2. Análisis de clúster

A continuación, se comentarán los resultados obtenidos al aplicar el análisis de clúster. Para poder determinar los clústers, se realizaron diagramas de árbol jerárquico, también conocidos como dendograma. En estos diagramas se observa la distancia entre los puntos y se muestra la agrupación que se va conformando. Luego, uno toma un criterio para determinar el número de clústers que desea. Los resultados marcaron claramente que Mercedes y Melo no se agrupaban en ningún clúster, conformando clústers individuales. Considerando a las restantes estaciones, se definió como límite de conformación 4 clústers. Dado este límite, se conformaron otros dos clústers, el primero abarca a las estaciones Carrasco, Prado, Estanzuela, Rocha y Rivera, observándose que, a excepción de Rivera, todas pertenecen al Sur del Uruguay. El segundo contiene a Paysandú, Salto, Paso de los Toros y Artigas.

Para estudiar la robustez de los clústers, se procedió a repetir el análisis, pero quitando años a las series de forma aleatoria (5 y 10 años). Lo que se pudo constatar es que las estaciones de Artigas y Rivera no conformaban siempre el mismo clúster, cayendo en uno u otro dependiendo de los años que se quitaban. Por este motivo, y sumado a que ambas poseen períodos prolongados de cierre, se decidió dejarlas por fuera de este análisis. De este estudio surge el árbol jerárquico que se muestra en la figura 5.1.

En este análisis queda clara la conformación de dos regiones, una primera que contiene a Estanzuela, Prado, Carrasco y Rocha (zona Sur) y la otra conformada por Paso de los Toros, Paysandú y Salto (zona Centro-Noroeste).

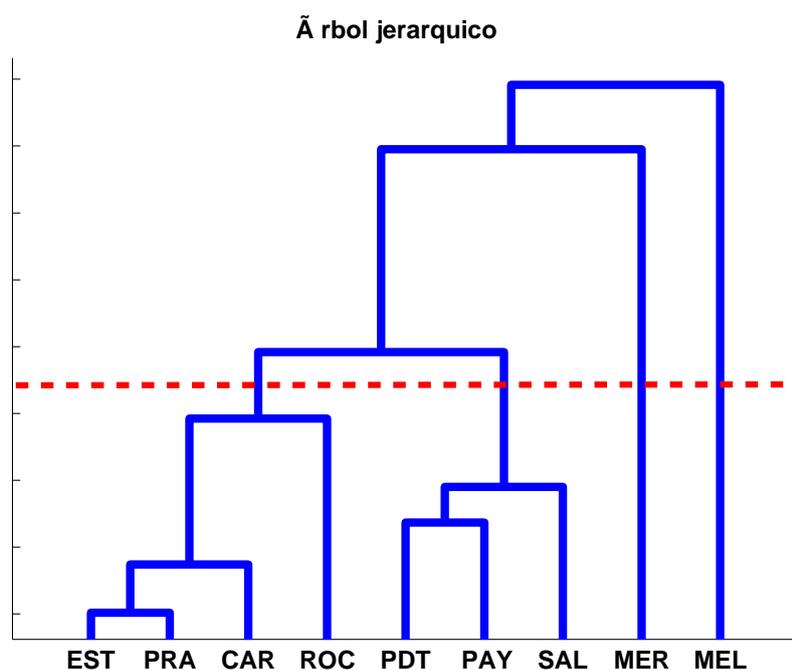


Figura 5.1: Árbol jerárquico; línea roja: límite de 4 clústers.

### 5.3. Análisis de componentes principales

Realizado el análisis de componentes principales, se obtuvo que los dos primeros CP y EOF explican el 74% de la varianza (65,3 y 8,6% respectivamente) del total de las series. Dado que los EOF muestran la variabilidad espacial, es de interés poder representarlos espacialmente. Para esto es que utilizamos la metodología empleada anteriormente, que consiste en interpolar mediante el método de Kriging para obtener el patrón espacial. En la figura 5.2 se muestran los dos primeros EOF.

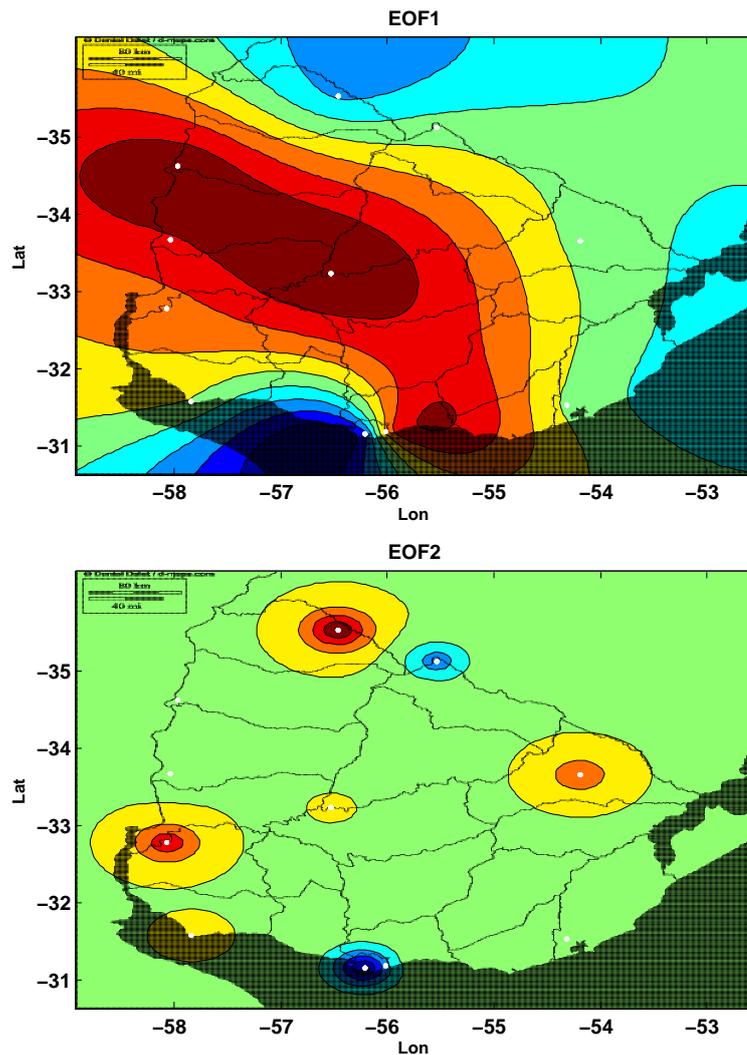


Figura 5.2: EOF1 y EOF2

En esta figura se puede observar en el primer EOF una regionalización de la ocurrencia de heladas. Esta va desde el centro del país hacia el noroeste, coincidiendo casi totalmente con uno de los clústers determinados en la sección anterior. El segundo EOF marca un comportamiento local de las estaciones de Melo, Mercedes, Rivera y Artigas. Es consistente un comportamiento local de estas estaciones, dado que en el estudio anterior las estaciones de Mercedes y Melo conformaban clústers independientes, a la vez que Artigas y Rivera no mostraban una clara regionalización.

---

# 6

## Conclusiones

---

## 6.1. Conclusiones

Este trabajo ha realizado un diagnóstico actualizado sobre la climatología de las heladas en el Uruguay, el cual podrá ser considerado por tomadores de decisión y en distintos sectores donde las heladas tengan un impacto en cualquiera de las características analizadas.

Como primer paso, se continuó con los trabajos de control de calidad de las series de Tn, encontrando un volumen de información a revisar que se proporcionará a las instituciones correspondientes.

Se observó que las primeras décadas del siglo XX fueron las más frías en los registros de Tn. En la década de los 40 se constató un período más cálido descendiendo hasta los 70 y luego un aumento sostenido hasta la fecha. Del análisis diario de Tn, quedó en evidencia una variabilidad mayor en los meses de mayo – agosto, lo que sugiere un vínculo asociado a incursiones de aire cálido en los meses más fríos, no marcándose de manera inversa.

En cuanto a los eventos de heladas, al analizar el período común 1950 – 2009 a escala global se tienen en promedio 6,8 días con heladas por año, con una temperatura media de  $-1,1^{\circ}\text{C}$ . Se estableció como período de ocurrencia de heladas el que abarca los meses comprendidos entre abril – octubre, concentrándose la mayor cantidad de las heladas en los meses de junio, julio y agosto.

Las décadas del 50 y 60 son las que presentan mayor cantidad de eventos en términos generales. La tendencia no muestra cambios significativos en la ocurrencia de heladas. Es importante destacar que, si bien la tendencia de la Tn en dichos meses es positiva, no se evidencia una relación directa con la ocurrencia de heladas.

Al considerar los distintos períodos analizados, se detectó que 3 de las estaciones que presentaban tendencia negativa en el período 1907-2009, pierden la significancia estadística en el período 1950-2009. Este hecho se puede atribuir al período más frío observado en las primeras décadas del siglo XX.

En cuanto al largo del período de heladas, se constató una disminución de aproximadamente 5 días por década, así como un corrimiento en la fecha promedio de ocurrencia de heladas, siendo este de 7 días hacia el mes de agosto entre la primer y última década.

El evento más intenso registrado fue el 14 - 16 de junio de 1967, alcanzando valores menores a  $-4^{\circ}\text{C}$  en casi todo el país. El análisis de la intensidad de las heladas muestra que el intervalo que comprende los eventos con temperaturas inferiores a  $-2^{\circ}\text{C}$  ha disminuido a lo largo del período de estudio. Esto se observa claramente en las estaciones Estanzuela, Prado, Carrasco, Paysandú, Rivera y Melo. Es importante destacar que, excepto en La Estanzuela, se presenta una tendencia positiva en la  $T_n$ , sugiriendo una relación entre la  $T_n$  y la disminución en la intensidad de las heladas.

En cuanto a la persistencia (días consecutivos con registro de heladas), la mayoría de los eventos se concentran entre 2 y 4 días y principalmente en los meses de junio y julio. Melo es la única estación que registró 2 días consecutivos de heladas en el mes de abril. Esto sucedió en 1972, año que presentó una alta ocurrencia de heladas.

Las heladas generalizadas permiten identificar casos que claramente responden a condiciones atmosféricas, ya que sobrepasan las condicionantes locales. En este trabajo, se definió helada generalizada cuando es detectada en más de 8 estaciones. Las heladas generalizadas se concentran principalmente en dos períodos: entre 1950 - 1970 y en la década del 90. Es importante notar que, pese al aumento en los valores medios de  $T_n$  desde la década de los 70, la década del 90 muestra un aumento importante en la cantidad de este tipo de eventos. Este hecho manifiesta

un comportamiento que justifica un trabajo a futuro para analizar las condiciones atmosféricas que favorecen las heladas generalizadas.

La regionalización analizada por las dos metodologías permite definir 2 zonas con comportamientos similares en cuanto al período de ocurrencia de heladas. La primer zona comprende las estaciones de: Paso de los Toros, Paysandú y Salto; y la otra: Estanzuela, Prado, Carrasco y Rocha. Melo y Mercedes son dos estaciones que muestran un comportamiento distinto a las demás estaciones, lo cual se pone en evidencia en los diferentes análisis realizados.

De todo este análisis, se observa que si bien no hay cambios significativos en la ocurrencia de heladas, estas se concentran en un período de tiempo más corto, que presenta además un corrimiento hacia el mes de agosto de la fecha central.

Este trabajo realiza un análisis de heladas de manera actualizada, con metodologías aplicadas a nivel internacional y regional, con la rigurosidad que merece. Sería de mucha utilidad para el país poder continuar en esta línea de trabajo, analizando índices de las regionalizaciones encontradas. Estos índices podrán ser utilizados para realizar estudios que los vinculen con los procesos atmosféricos relacionados y así poder estudiar su potencial predictabilidad, así como comprender la física de los mismos.

## Referencias

---

- [1] *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológica*, 1996. Organización Meteorológica Mundial (OMM), 6ta edición.
- [2] ABREU, S. R. J. M. *Protección contra las heladas: fundamentos, practica economía*, 2010. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) ISBN 978-92-5-306504-2.
- [3] BURO, H. O. *El régimen de heladas en la República Oriental del Uruguay*, 1961. Archivos históricos de la Facultad de Agronomía - Universidad de la República, Uruguay.
- [4] BURO, H. O. *Humedad del aire y régimen de heladas*, 1993. Facultad de Agronomía - Universidad de la República, Uruguay.
- [5] FUREST, G. C. *Caracterización Agroclimática de Uruguay 1980 - 2009*, 2012. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Serie técnica: N193, ISBN: 978-9974-38.
- [6] LACROIX, H. *Las heladas y las viñas en el Uruguay*, 1973. Revista - Almanaque del Banco de Seguros del Estado, Uruguay.
- [7] MULLER, G. V. *Atmospheric circulation associated with extreme generalized frosts persistence in central-southern South America*, 2011. Published online: 12 June 2011 o Springer-Verlag 201.

- [8] RENOM, M. *Temperaturas extremas en Uruguay. Análisis de la variabilidad de temporal de baja frecuencia y su relación con la circulación de gran escala*, 2009. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- [9] RENOM, M. R. M. *Variability and trends in indices of quality-controlled daily temperature extremes in Uruguay.*, 2008. Int J of Clim, 28: 1083-1095. DOI: 10.1002/joc.1607.
- [10] SEN, P. *Estimates of the regression coefficient based on Kendall*, 1968. Journal of the American Statistical Association 63: 1379-1389.
- [11] STEIN, M. *Interpolation of spatial data: Some theory for Kriging*, 1999. ISBN 0-387-98629-4.
- [12] WILKS, D. *Statistical Methods in the Atmospheric Science*. 1997. Academic Press, 627 pp.

---

A

Anexo I

---

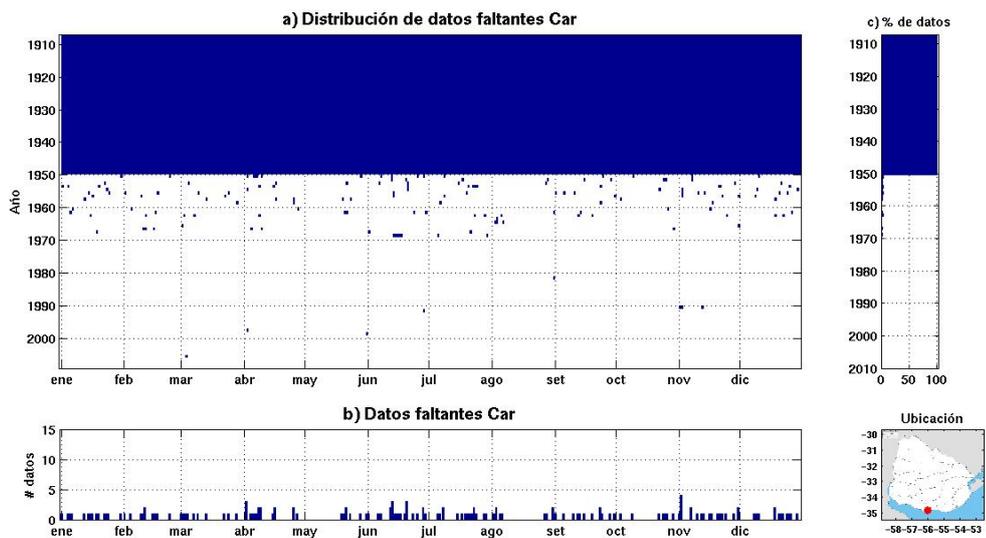


Figura A.2: Carrasco, Idem figura 1.2

A.1. Datos faltantes

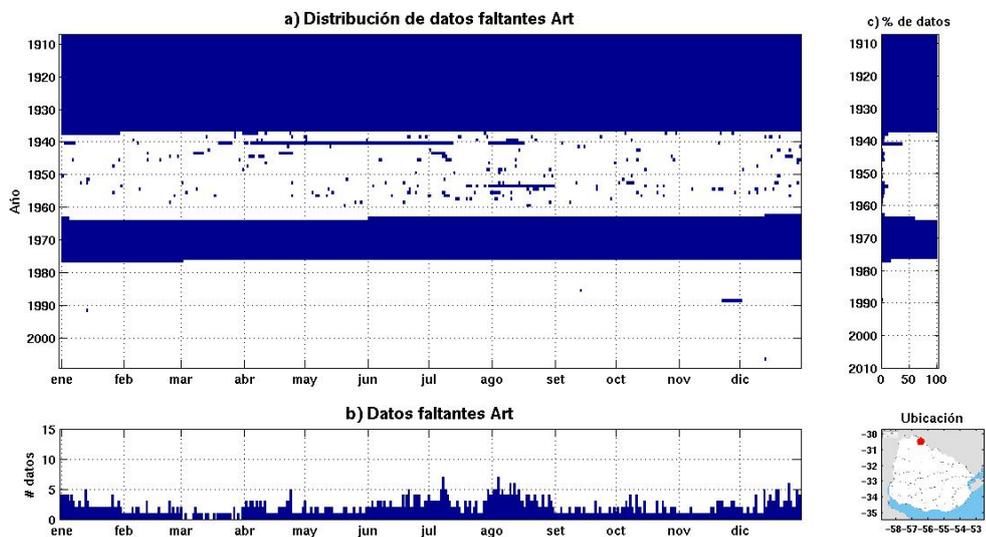


Figura A.1: Artigas, Idem figura 1.2

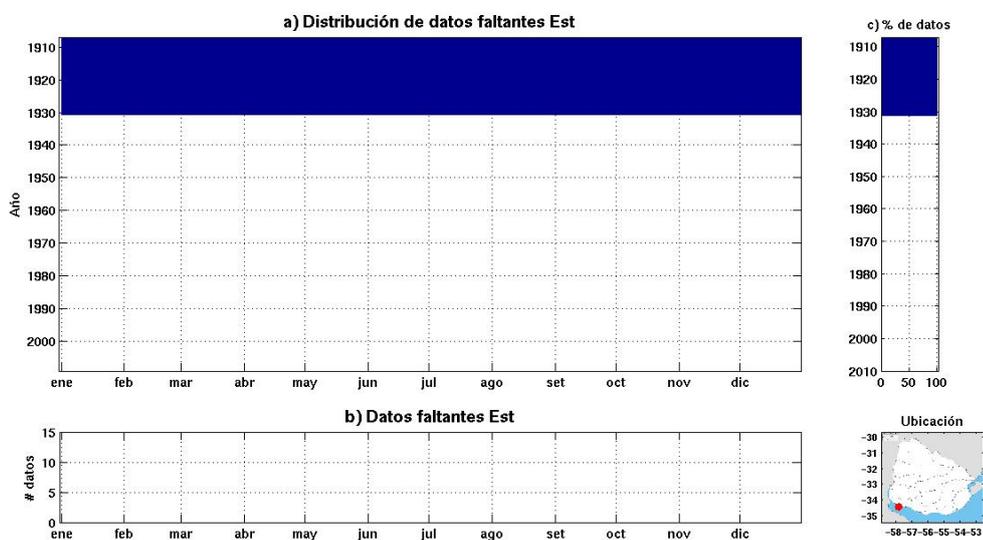


Figura A.3: Estanduela, Idem figura 1.2

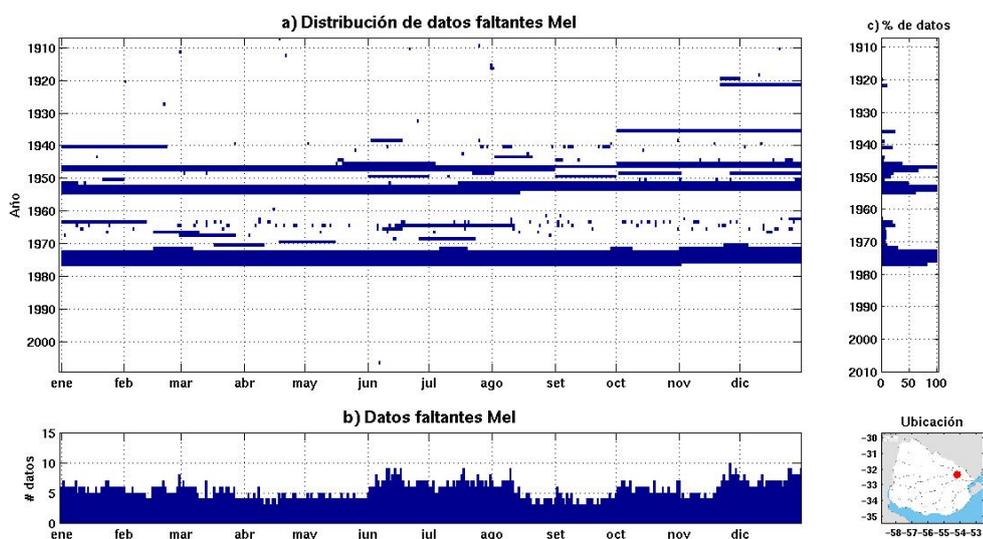


Figura A.4: Melo, Idem figura 1.2

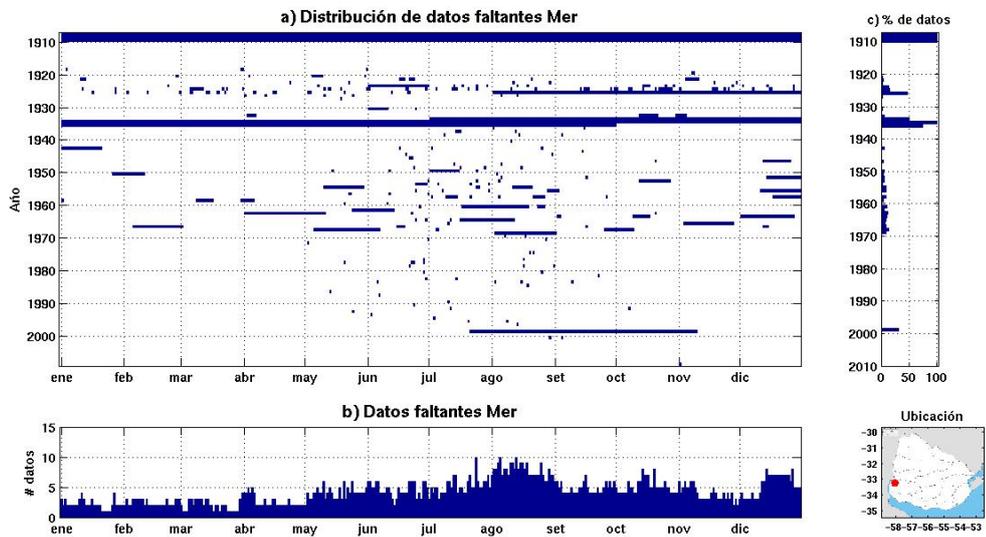


Figura A.5: Mercedes, Idem figura 1.2

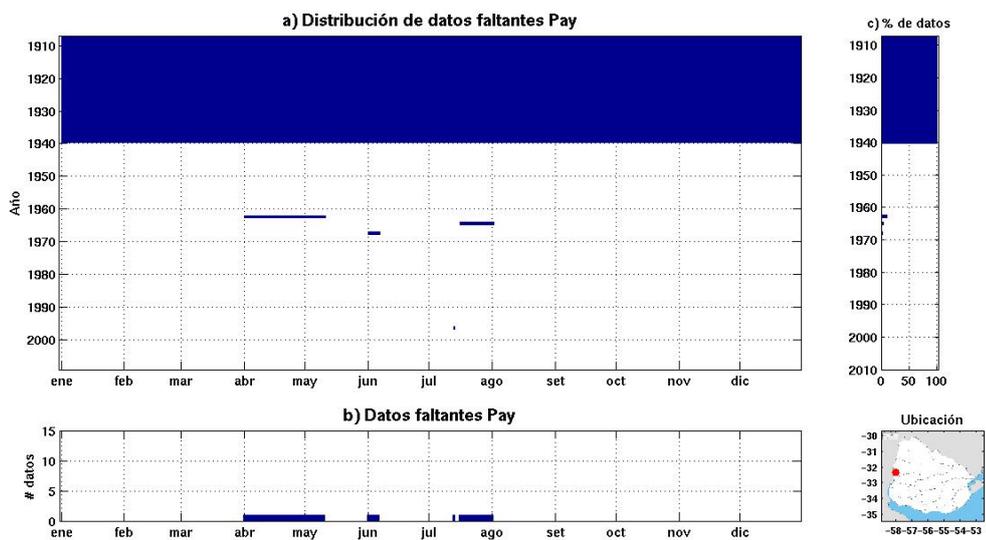


Figura A.6: Paysandú, Idem figura 1.2

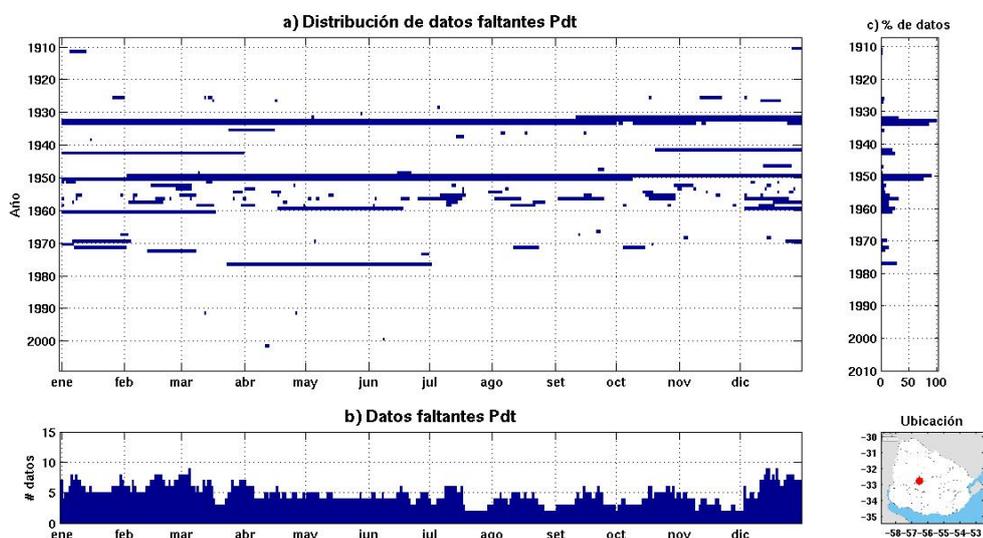


Figura A.7: Paso de los Toros, Idem figura 1.2

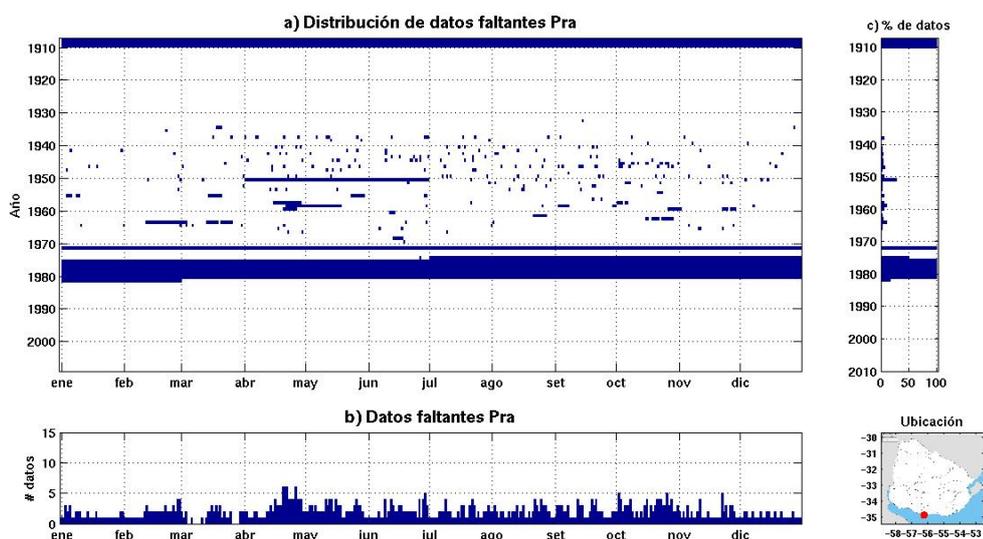


Figura A.8: Prado, Idem figura 1.2

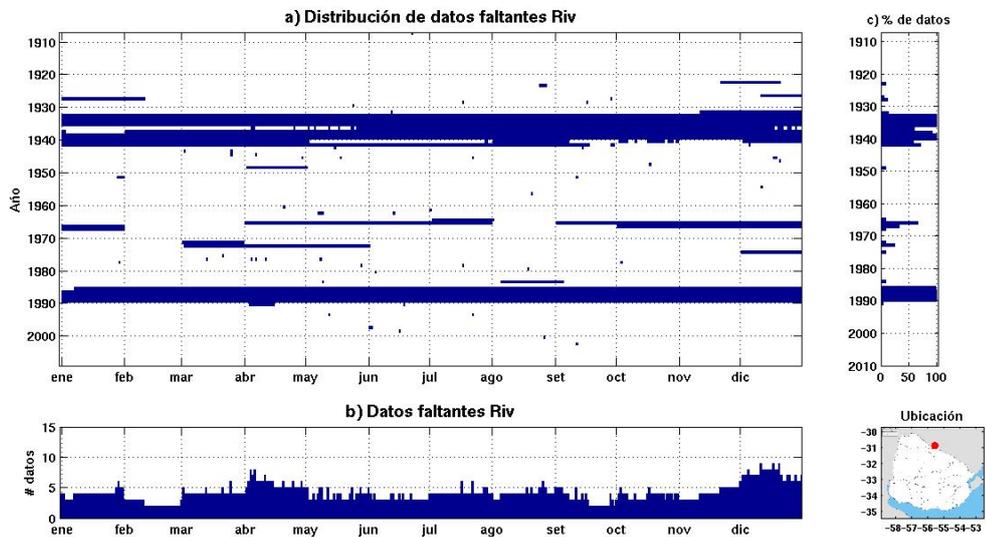


Figura A.9: Rivera, Idem figura 1.2

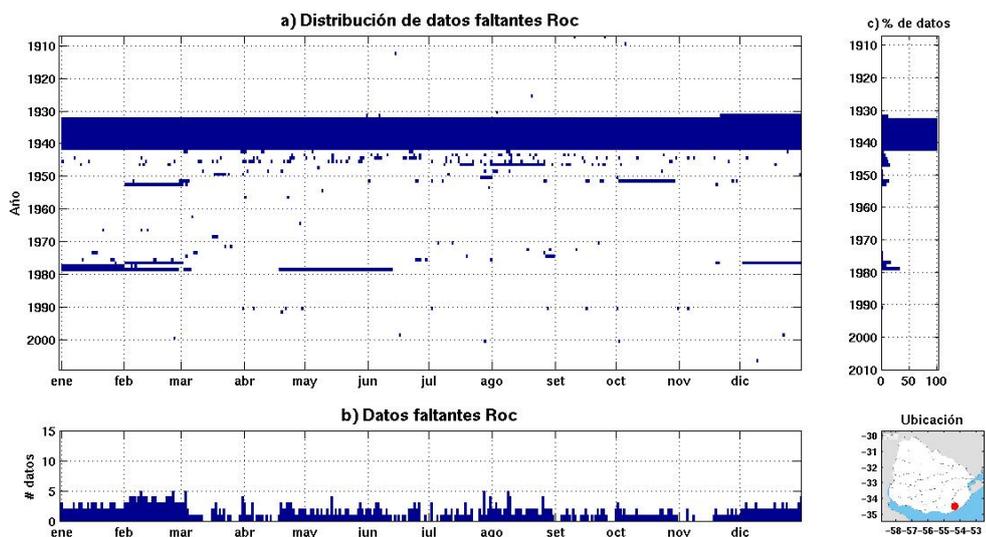


Figura A.10: Rocha, Idem figura 1.2

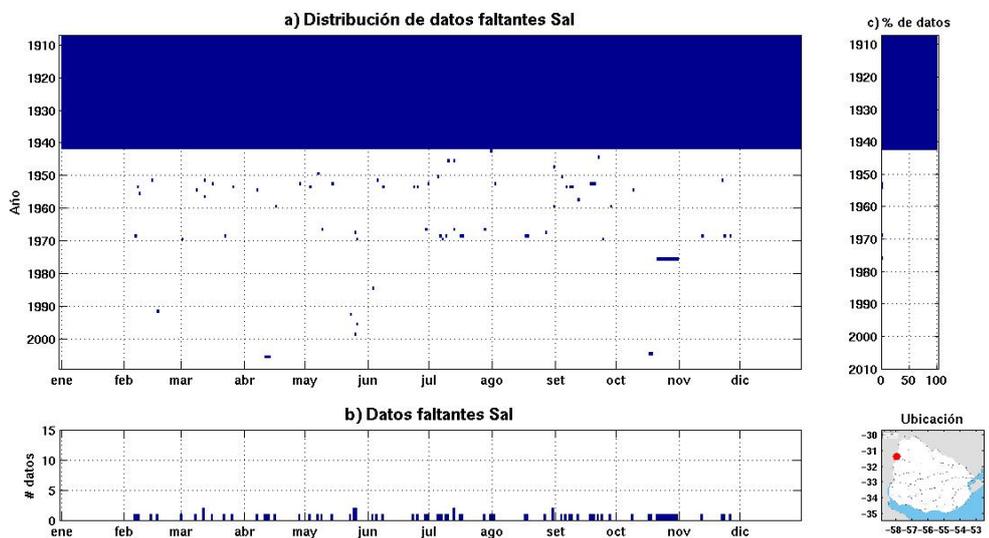


Figura A.11: Salto, Idem figura 1.2

---

A

Anexo II

---

A.1. Temperatura mínima 1950 - 2009

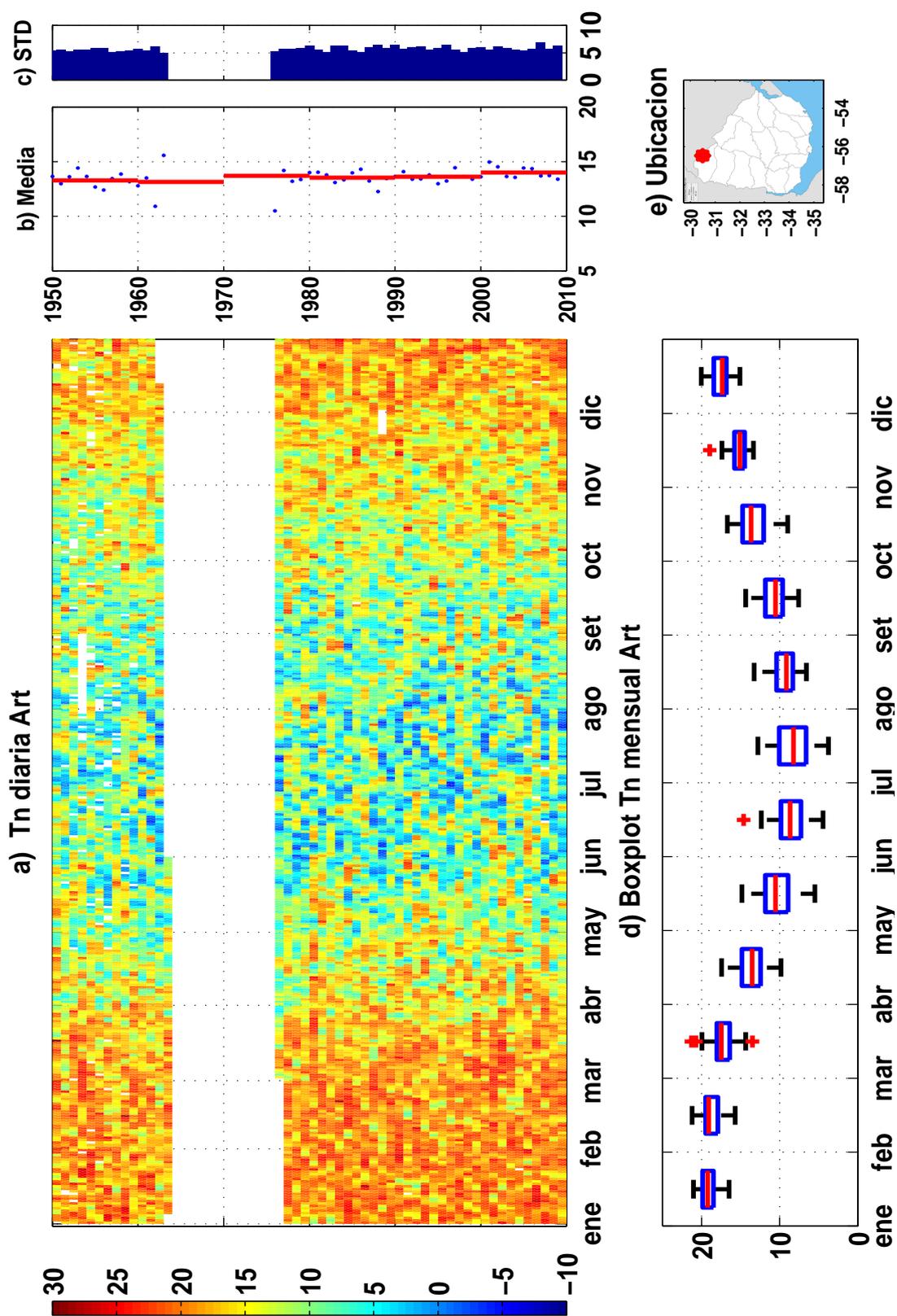


Figura A.1: Artigas, idem 2.9

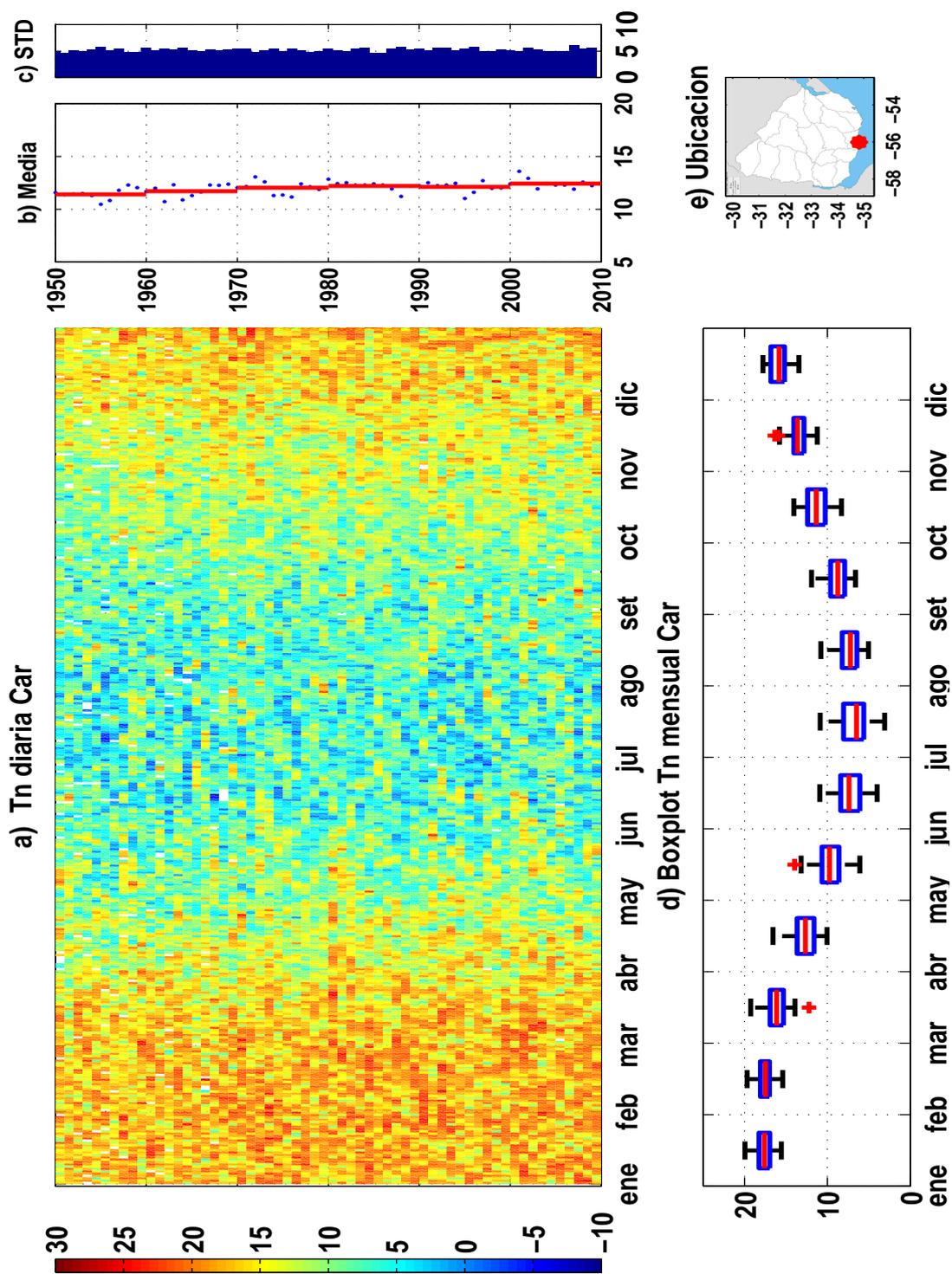


Figura A.2: Carrasco, idem 2.9

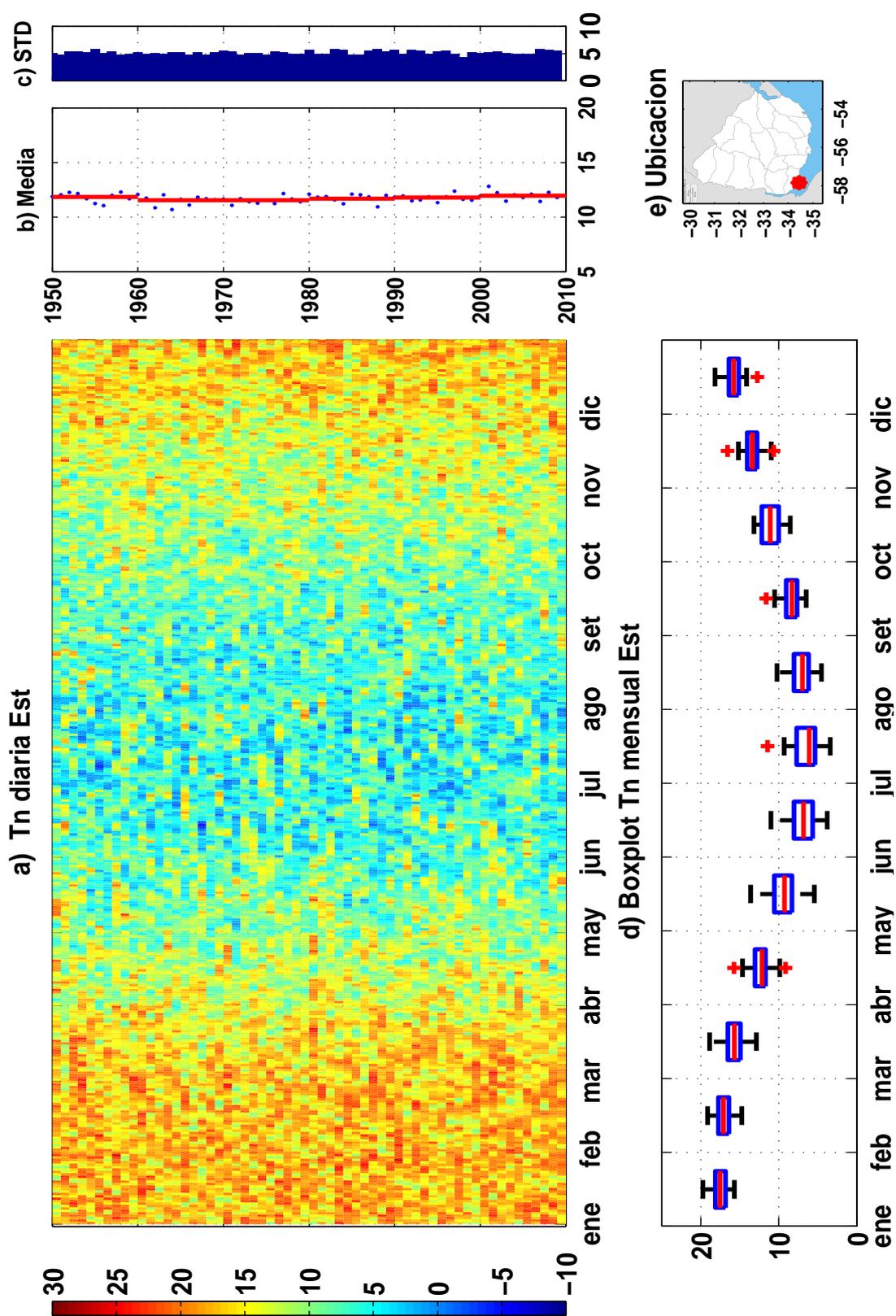


Figura A.3: Estanzuela, idem 2.9

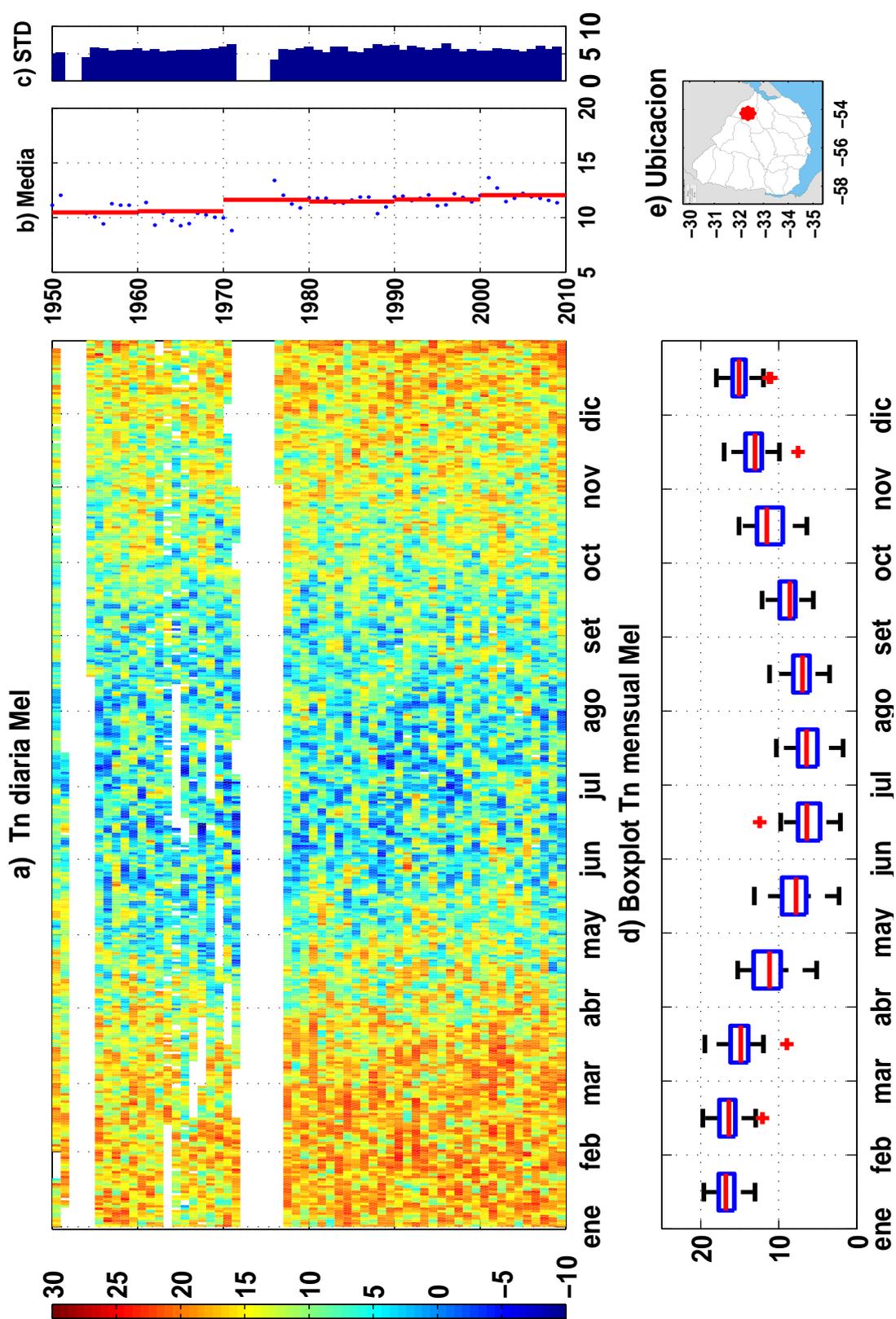


Figura A.4: Melo, idem 2.9

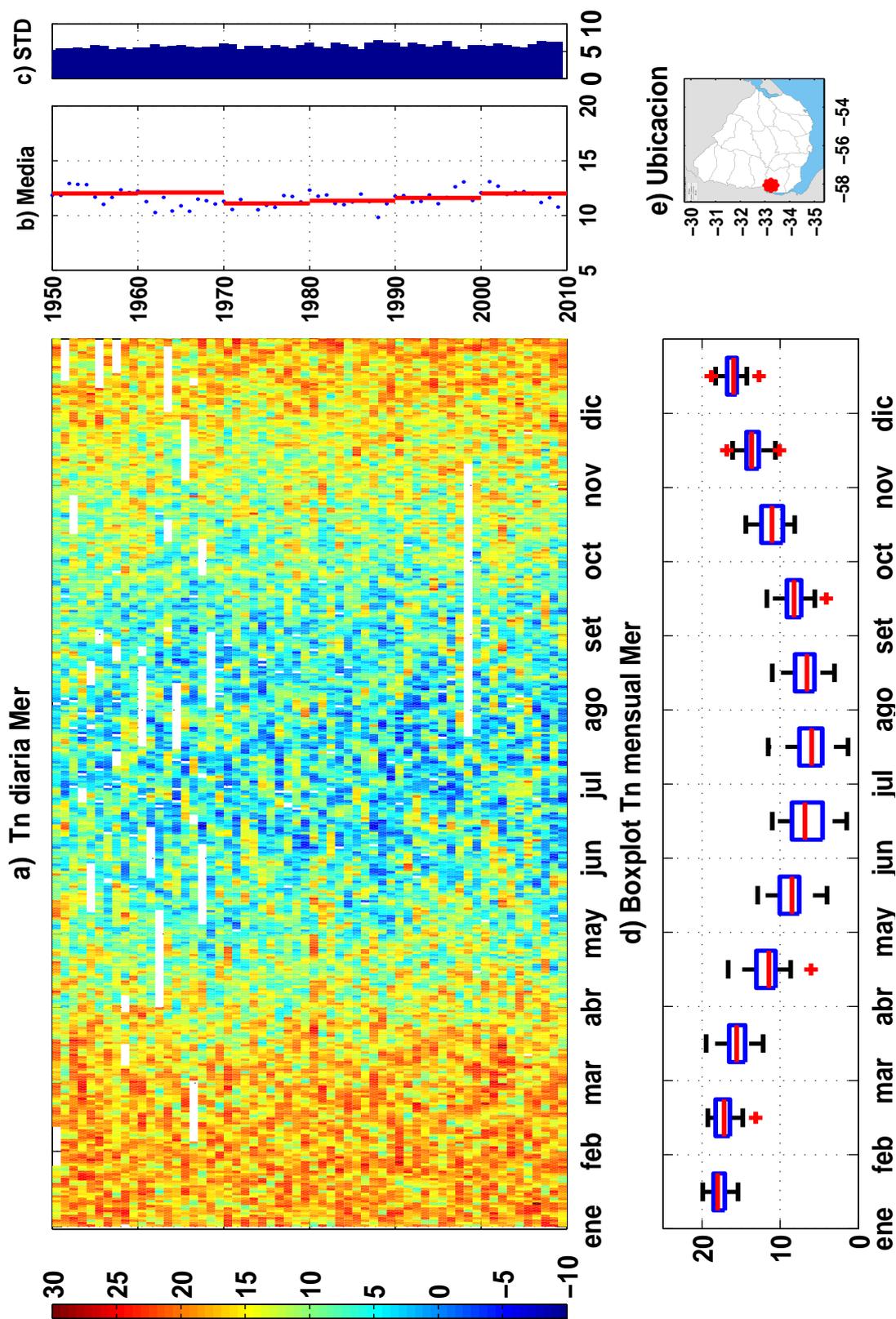


Figura A.5: Mercedes, idem 2.9

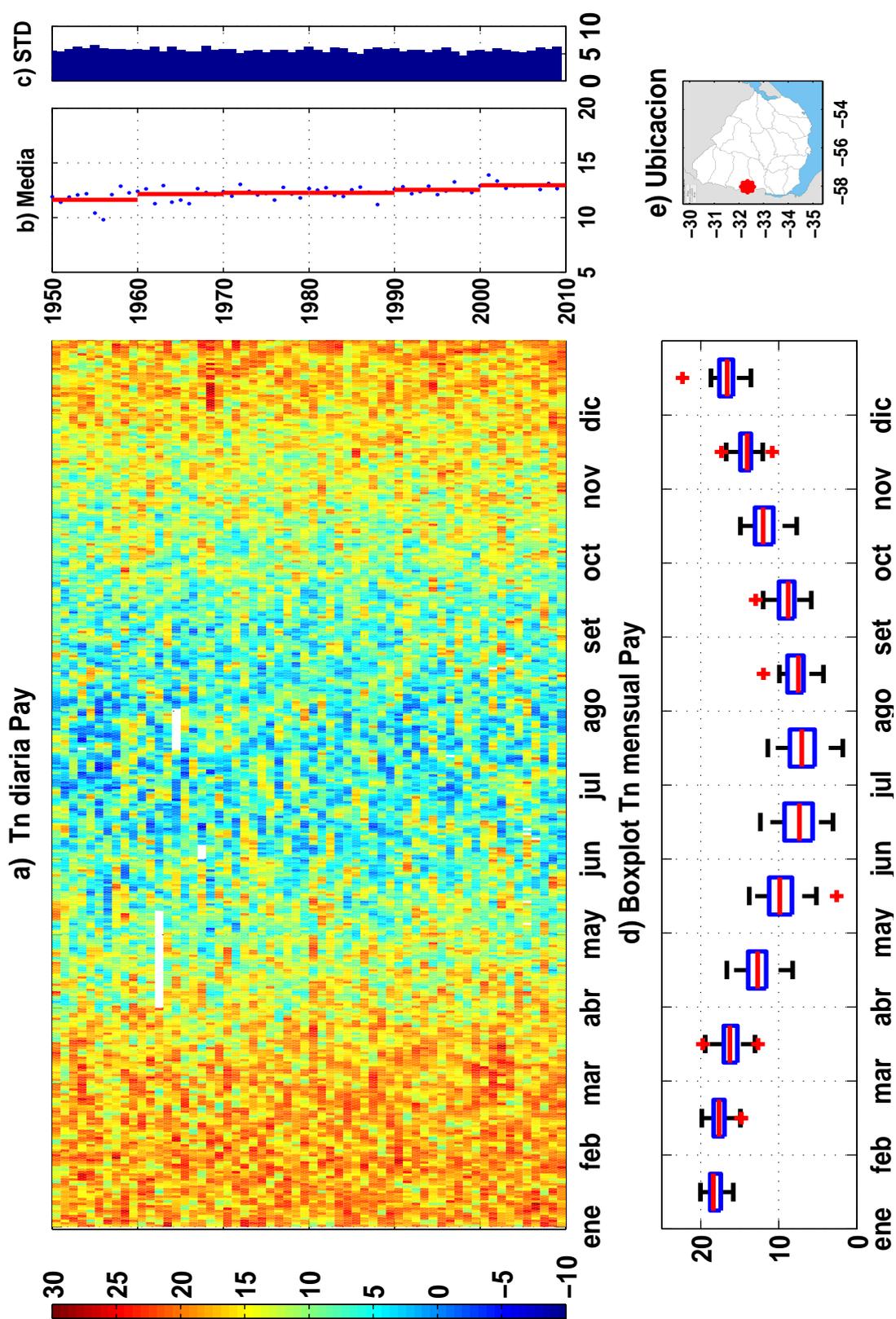


Figura A.6: Paysandú, idem 2.9

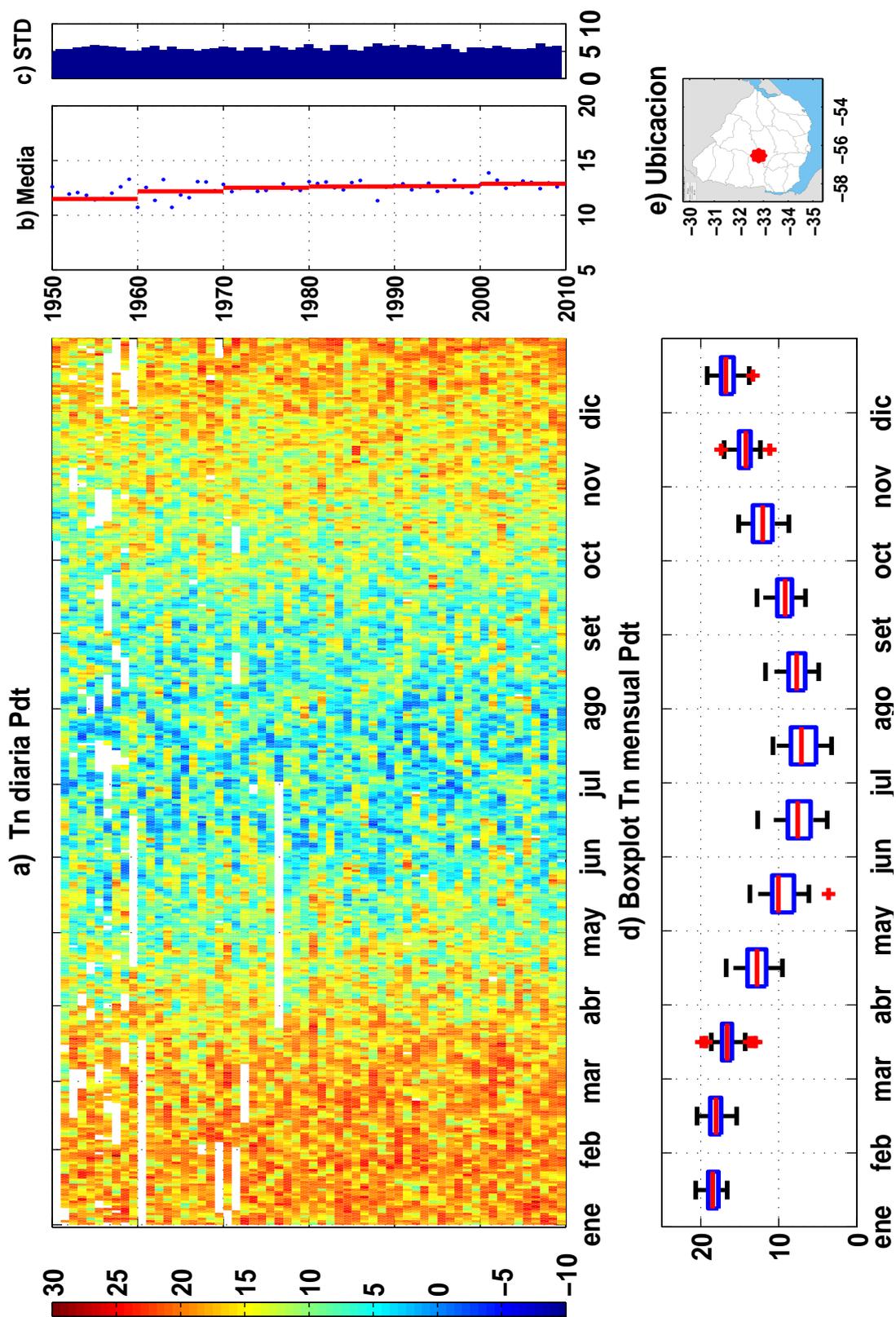


Figura A.7: Paso de los Toros, idem 2.9

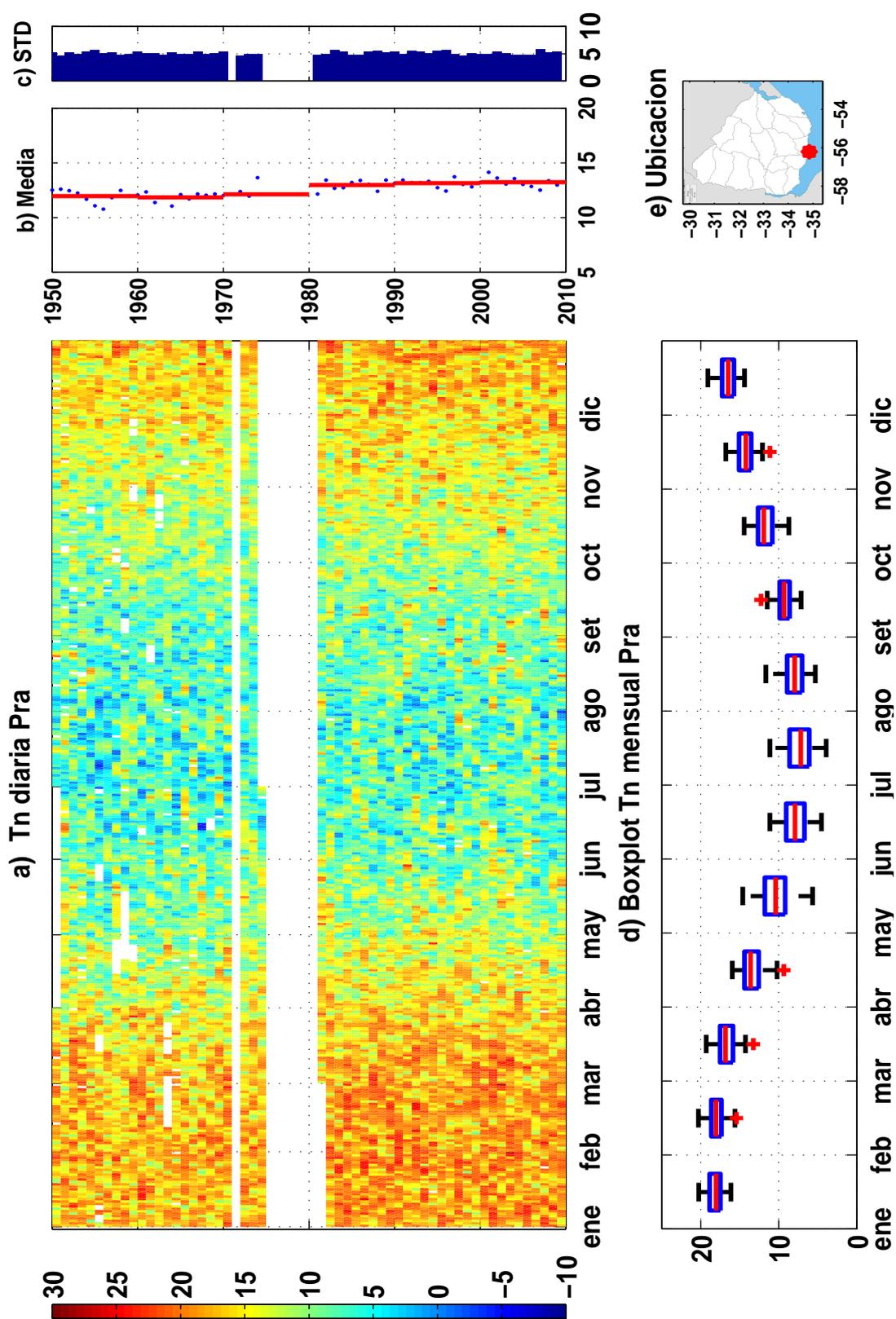


Figura A.8: Prado, idem 2.9

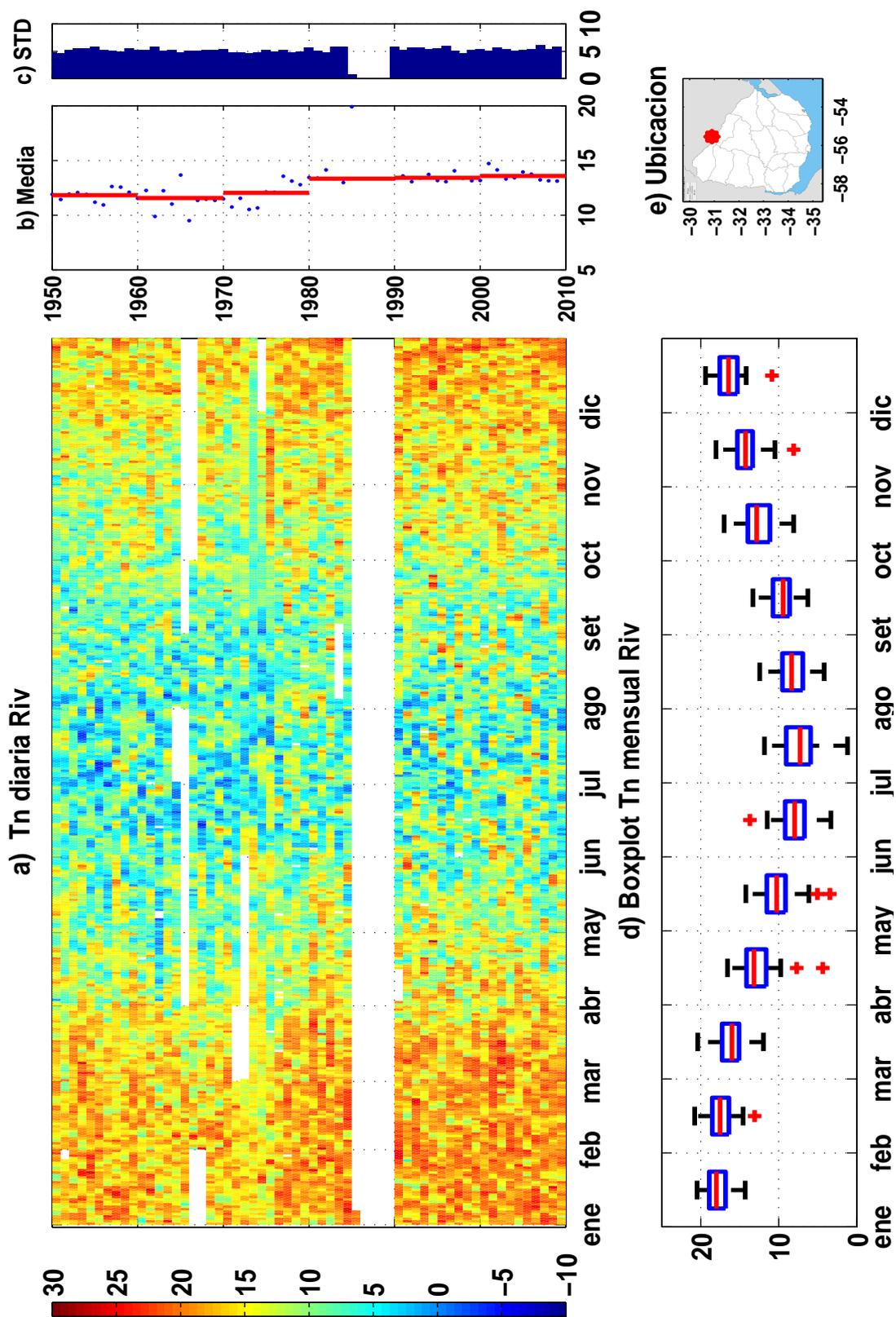


Figura A.9: Rivera, idem 2.9

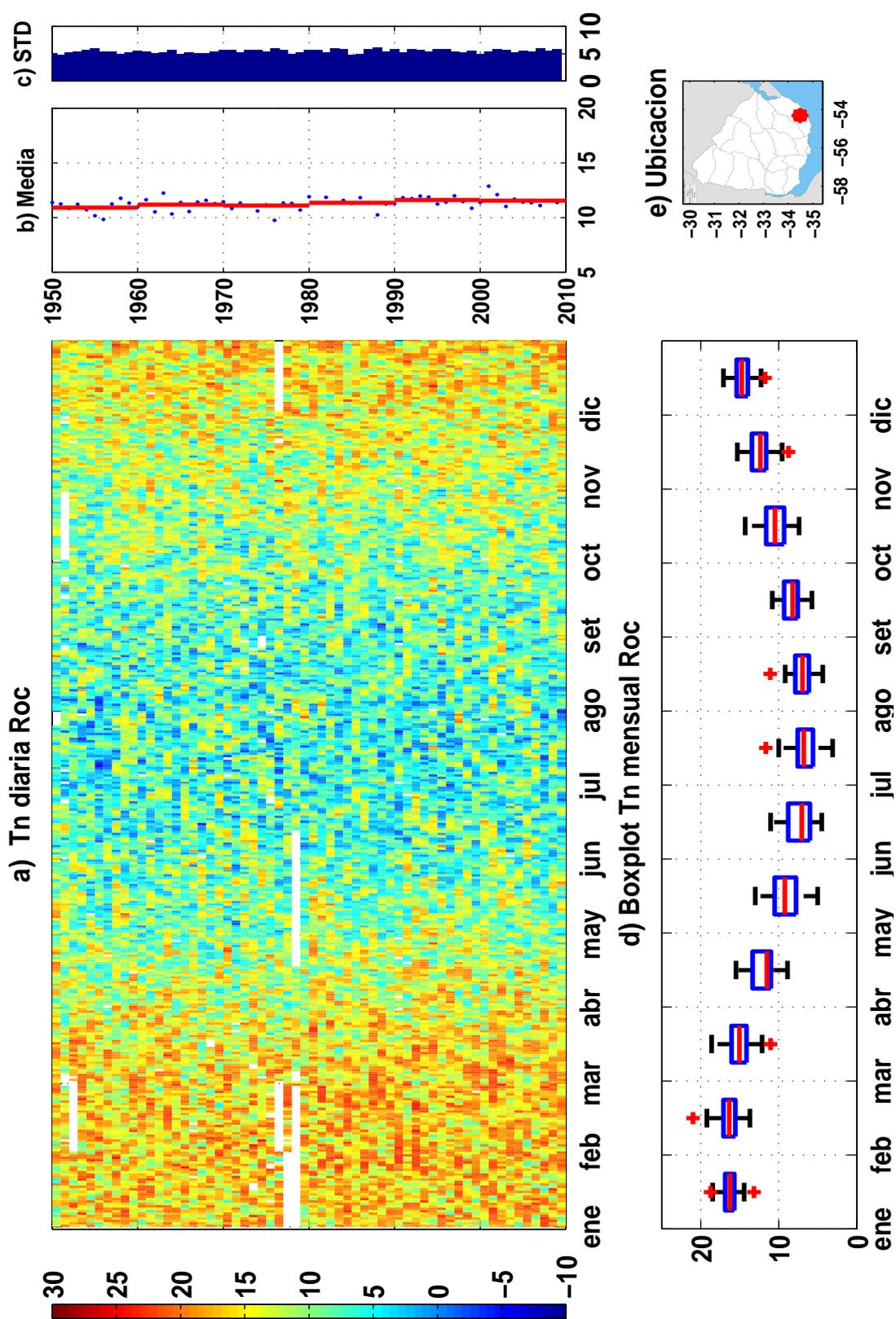


Figura A.10: Rocha, idem 2.9

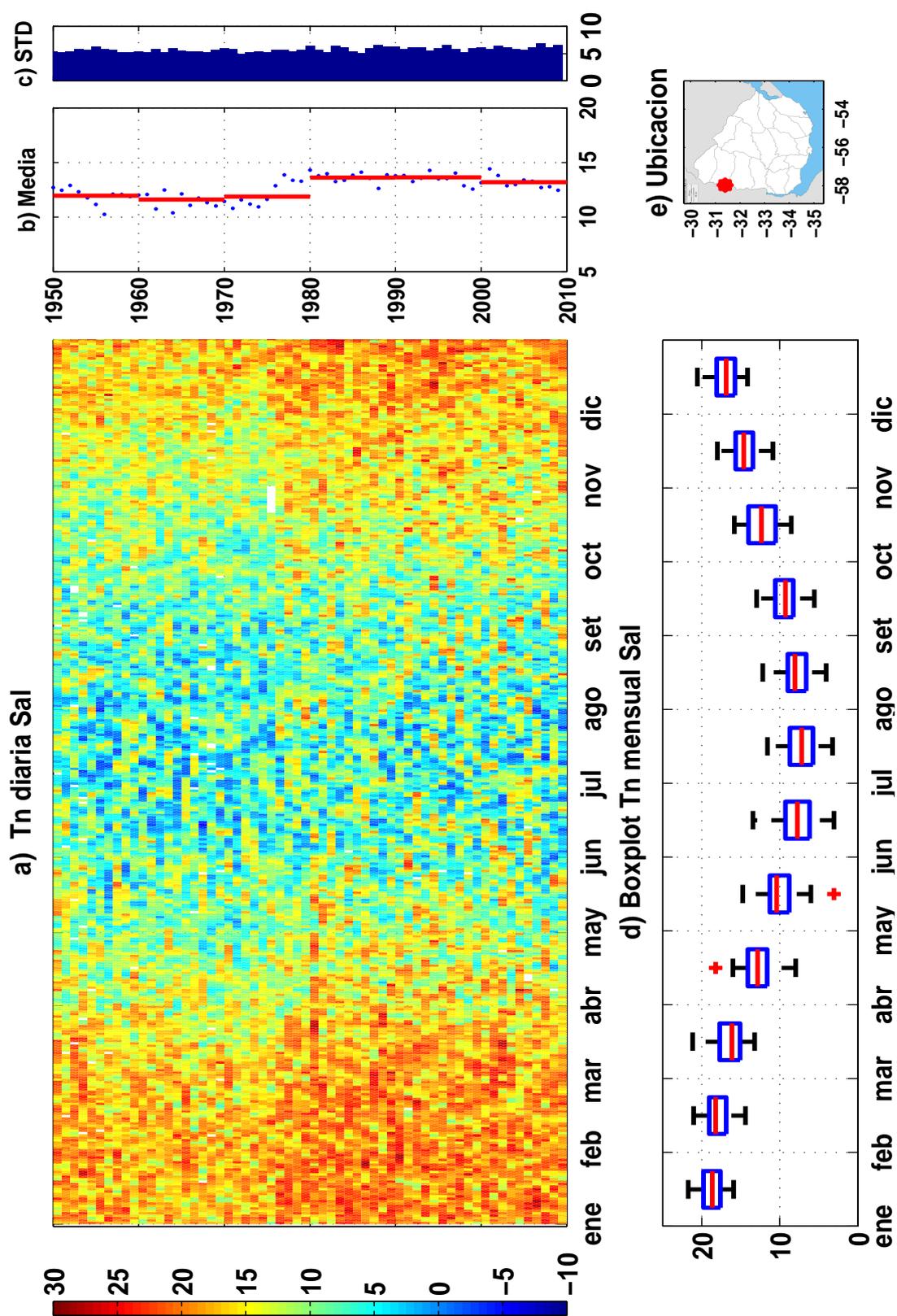


Figura A.11: Salto, idem 2.9

---

A

Anexo III

---

A.1. Heladas 1950 - 2009

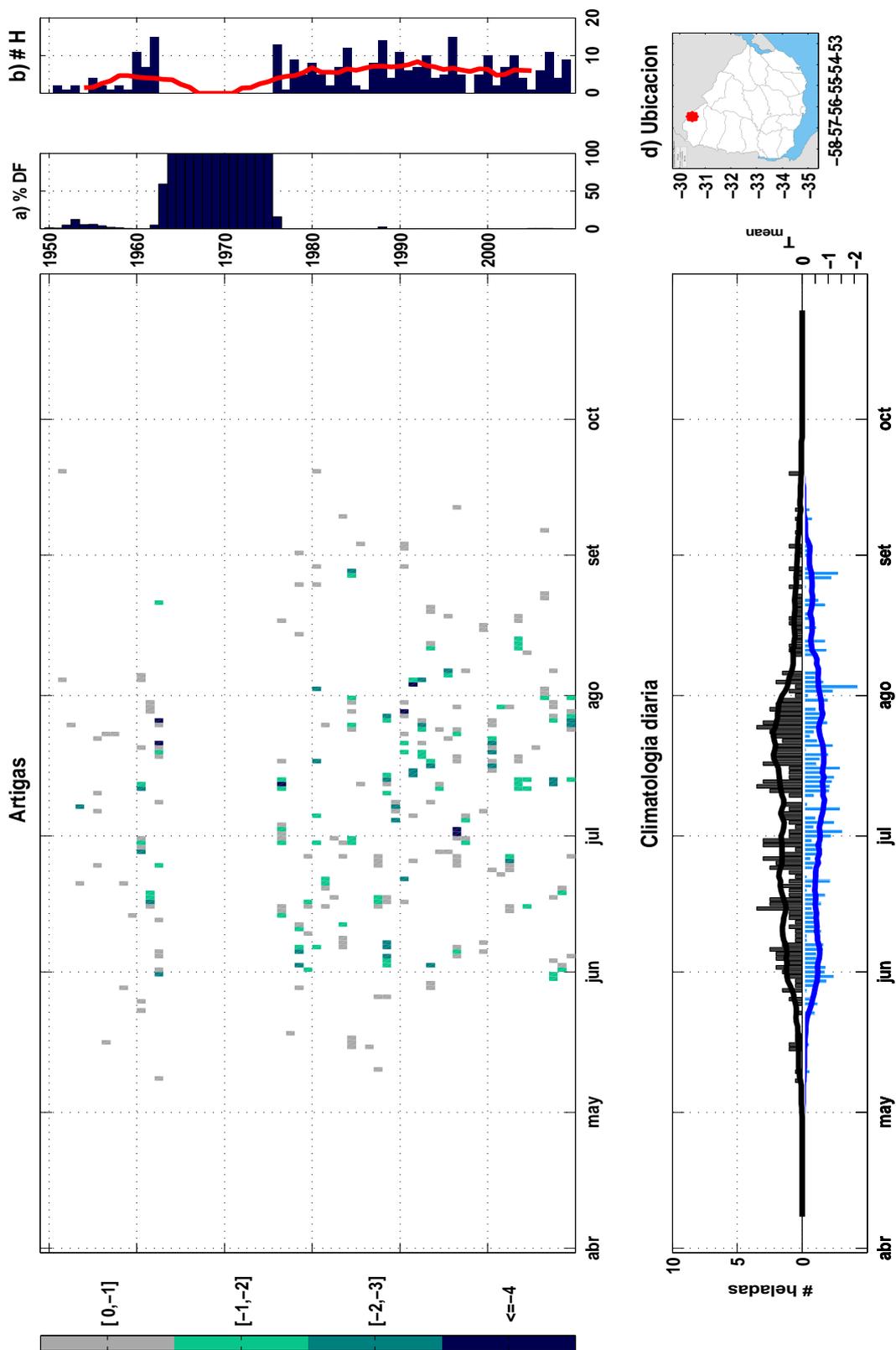


Figura A.1: Artigas, idem 3.4

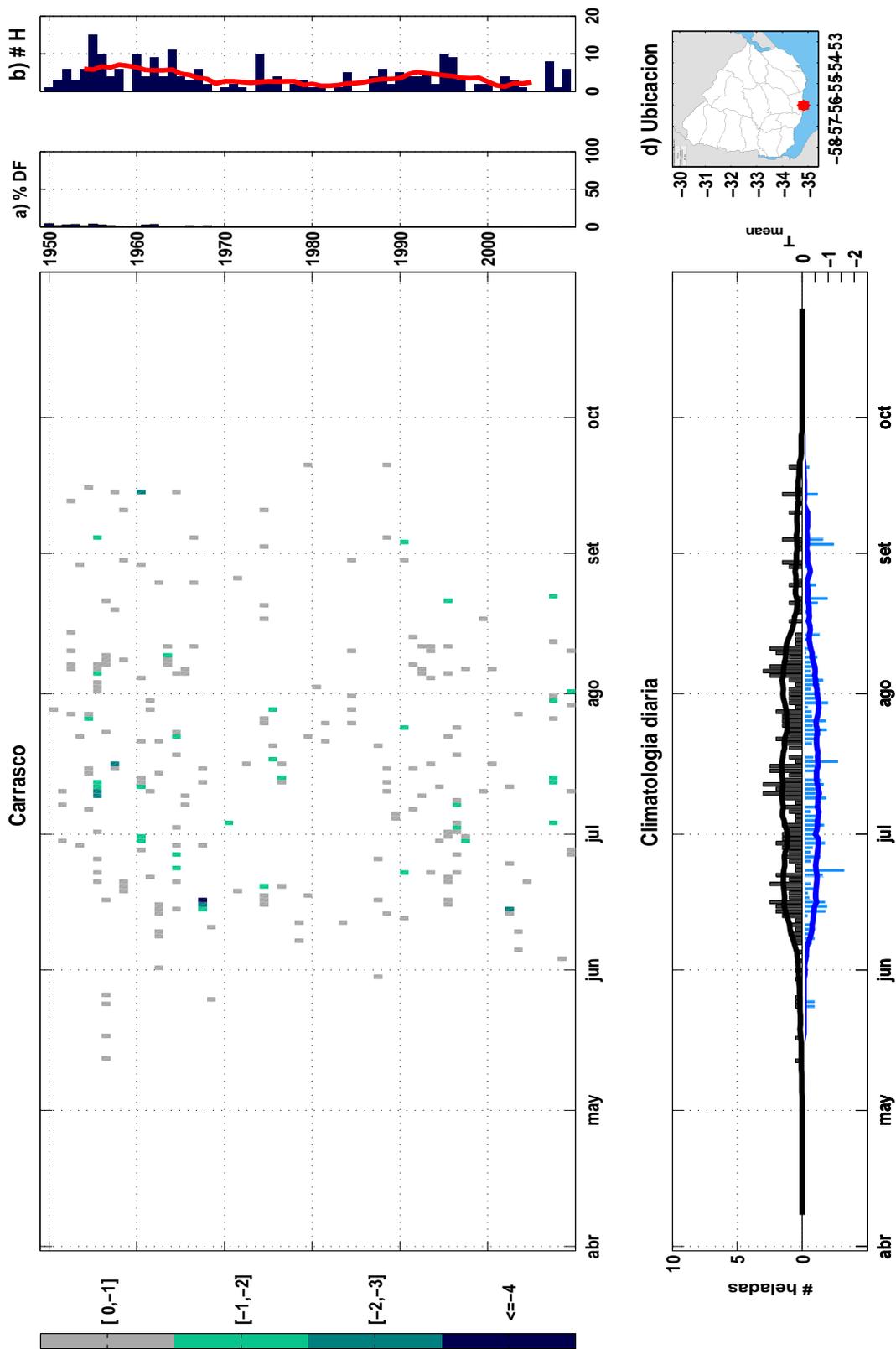


Figura A.2: Carrasco, idem 3.4

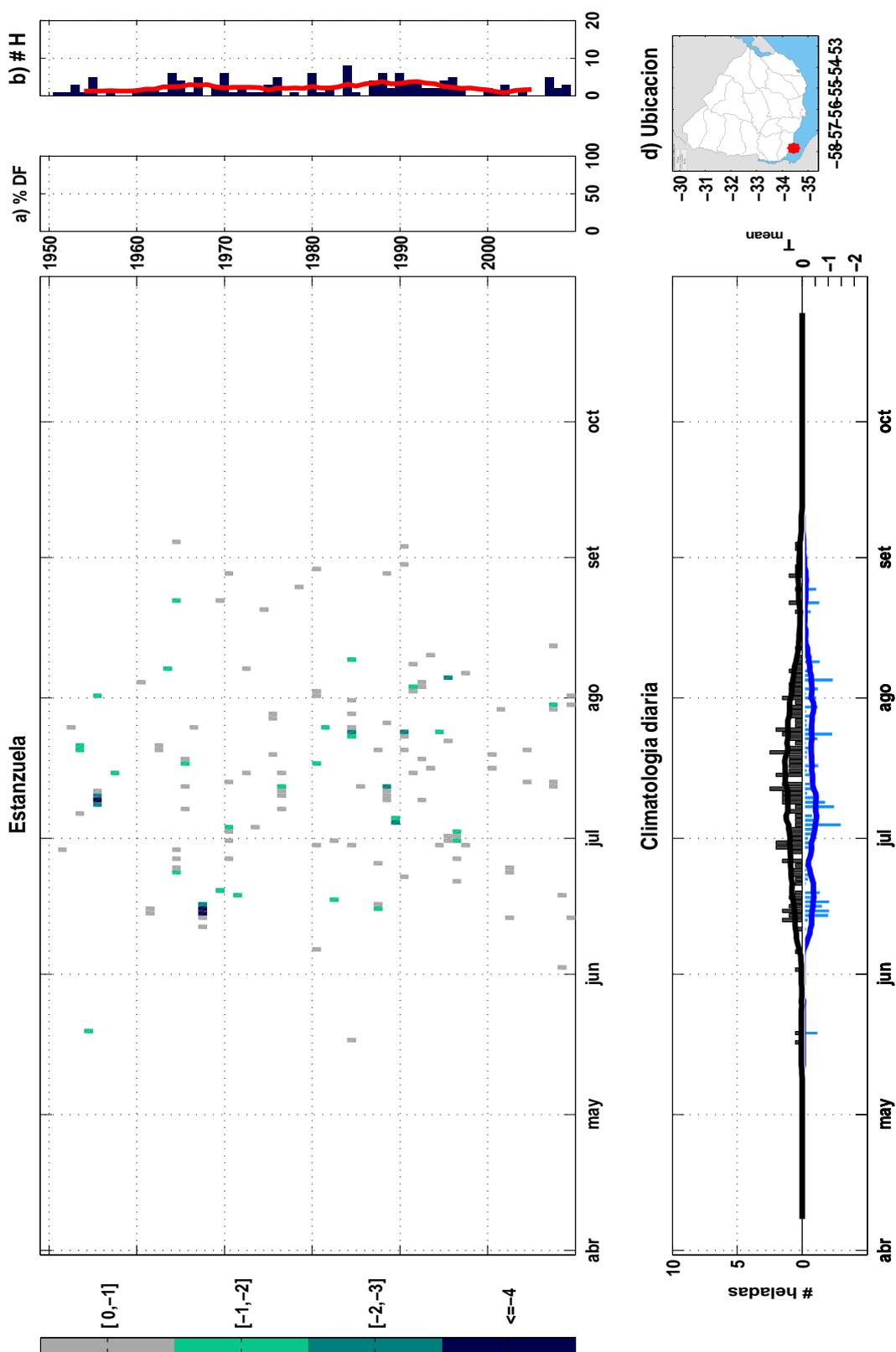


Figura A.3: Estanzuela, idem 3.4

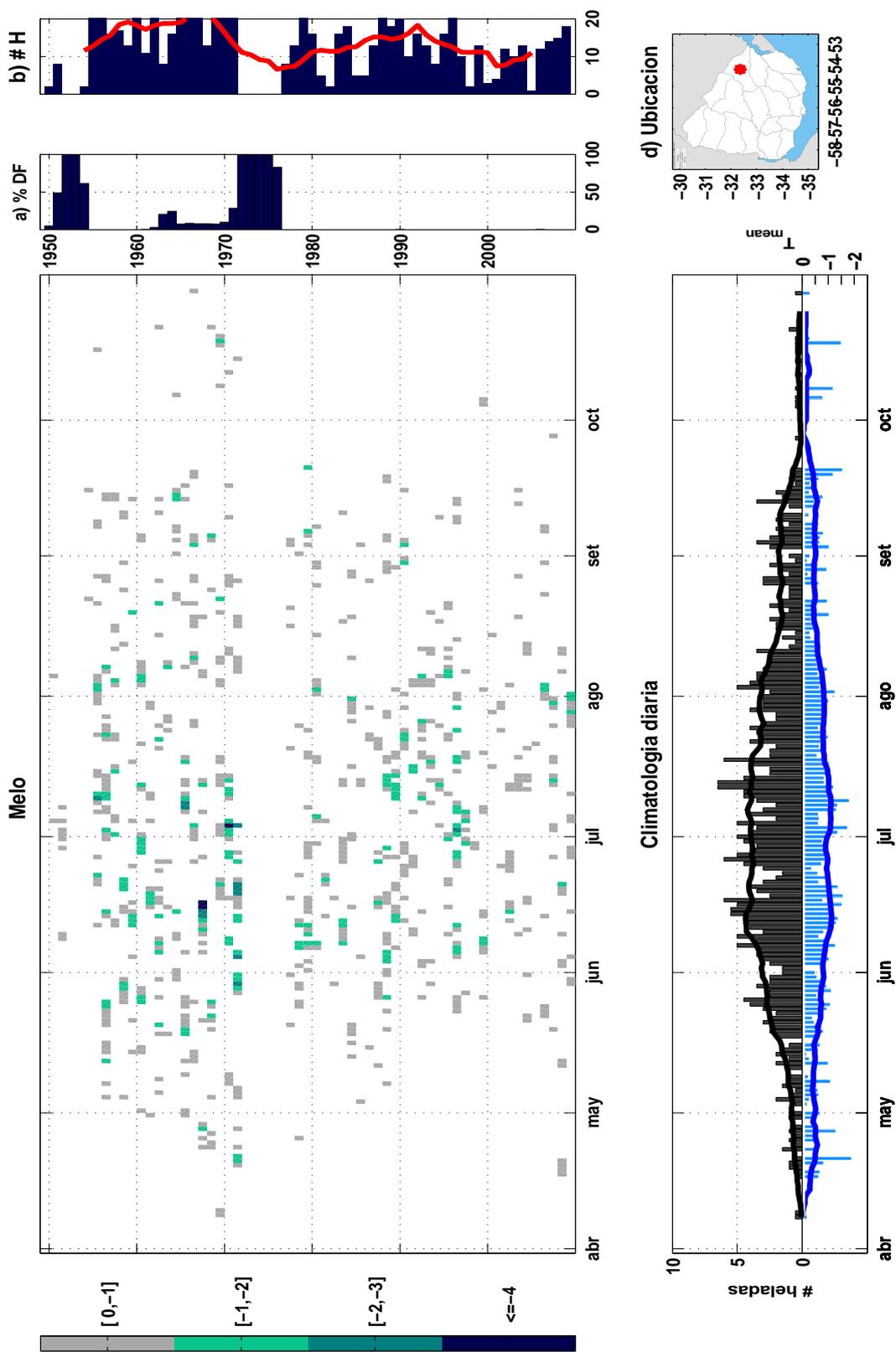


Figura A.4: Melo, idem 3.4

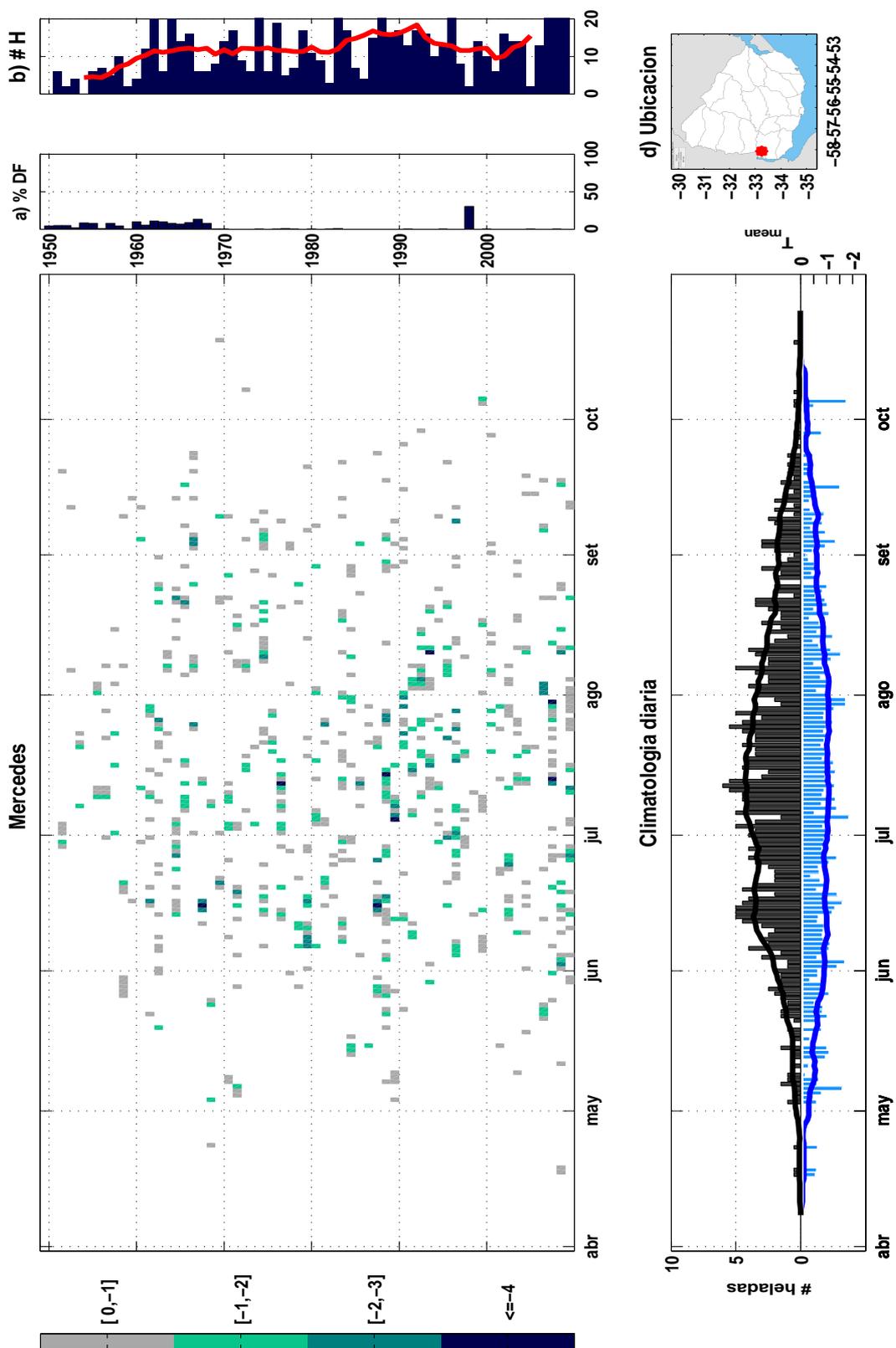


Figura A.5: Mercedes, idem 3.4

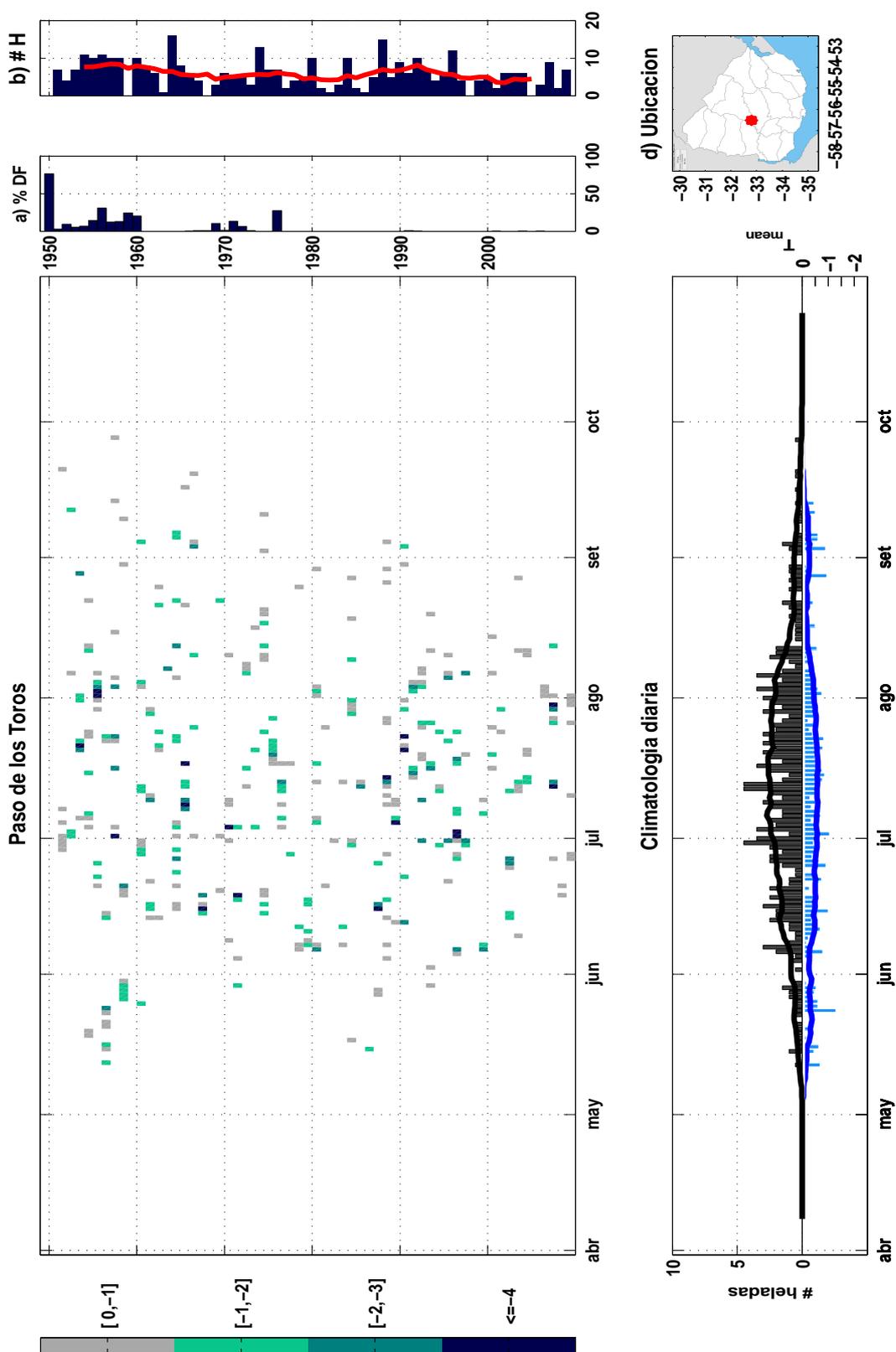


Figura A.6: Paso de los Toros, idem 3.4

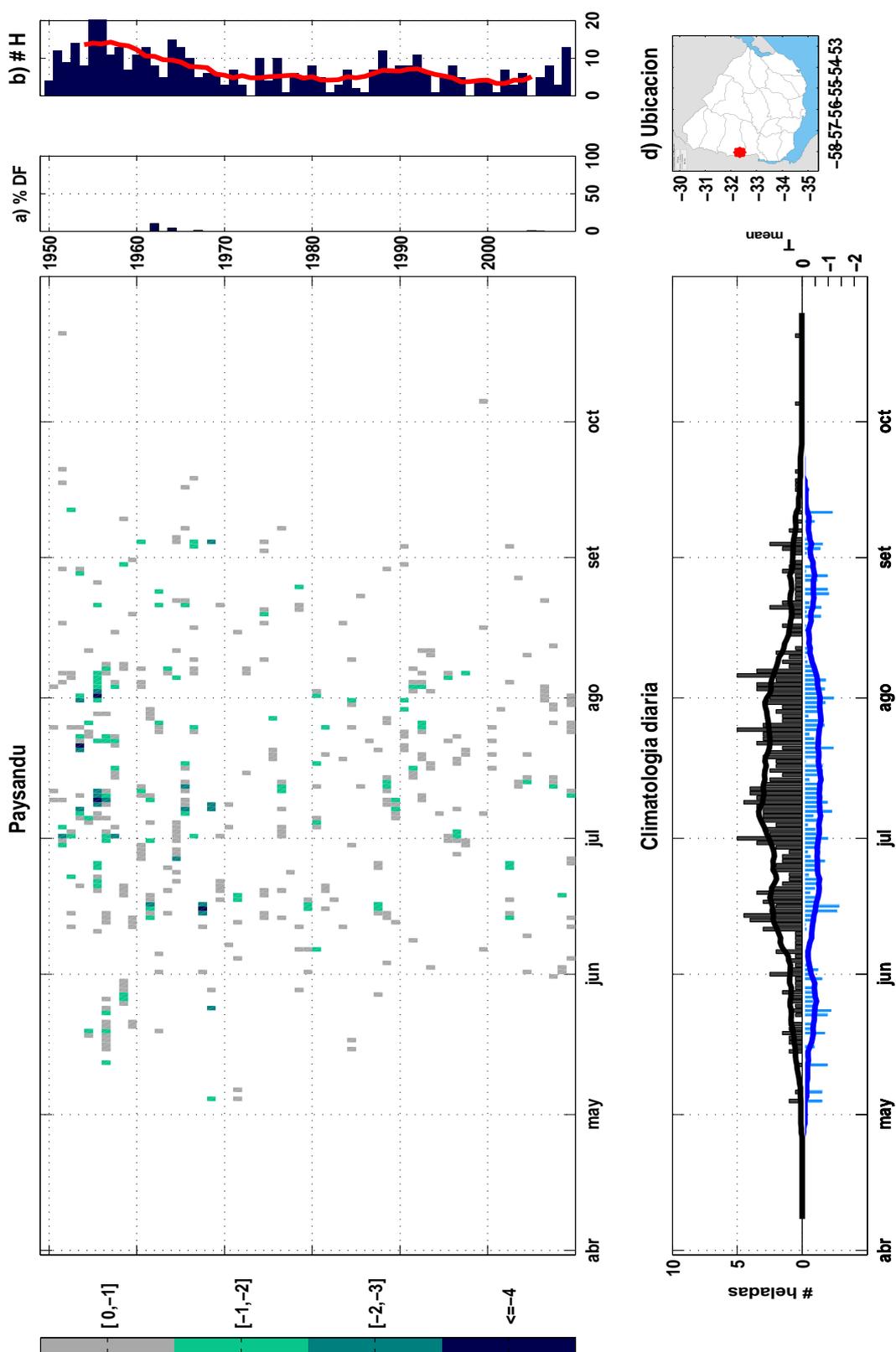


Figura A.7: Paysandú, ídem 3.4

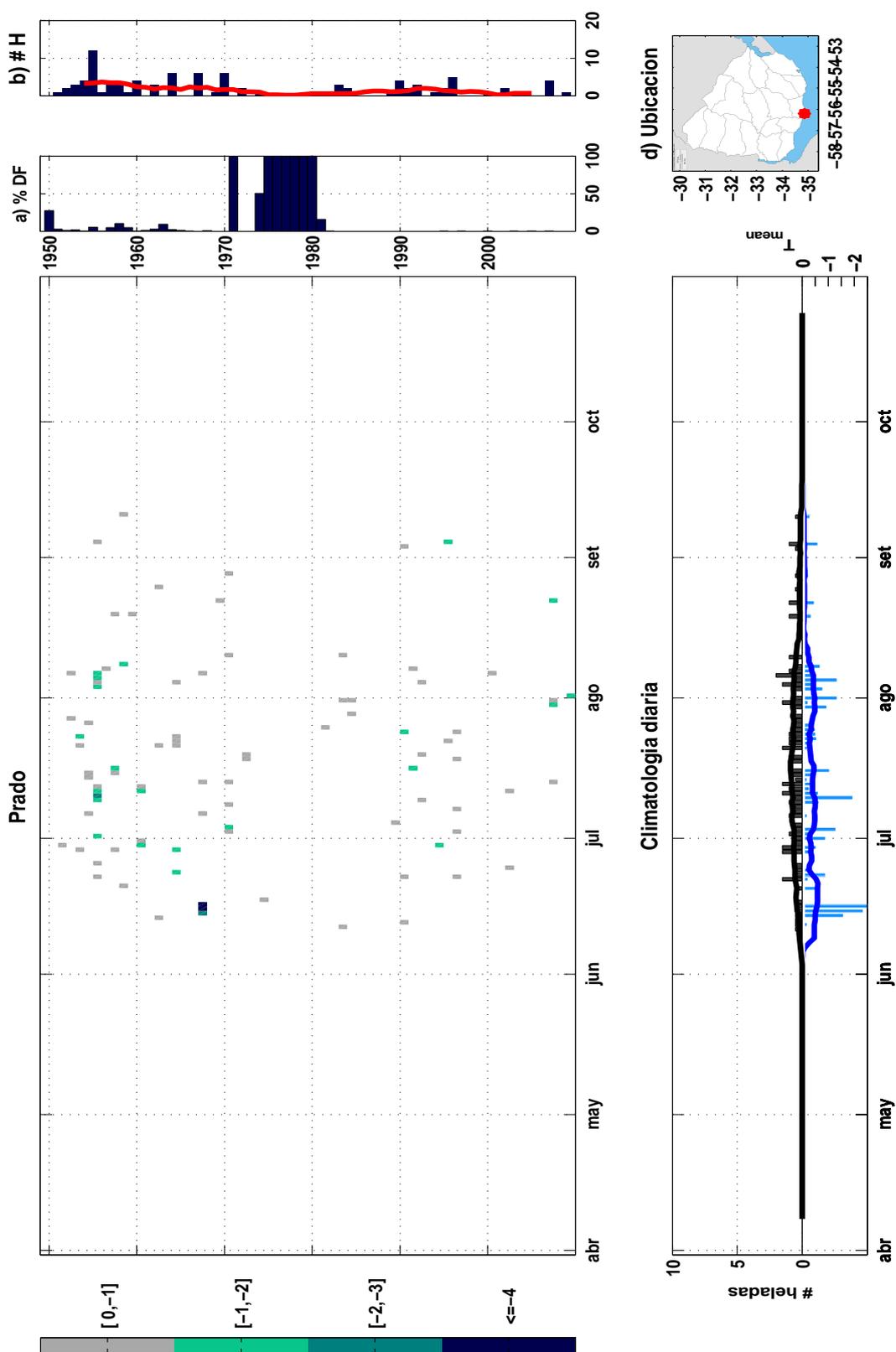


Figura A.8: Prado, idem 3.4

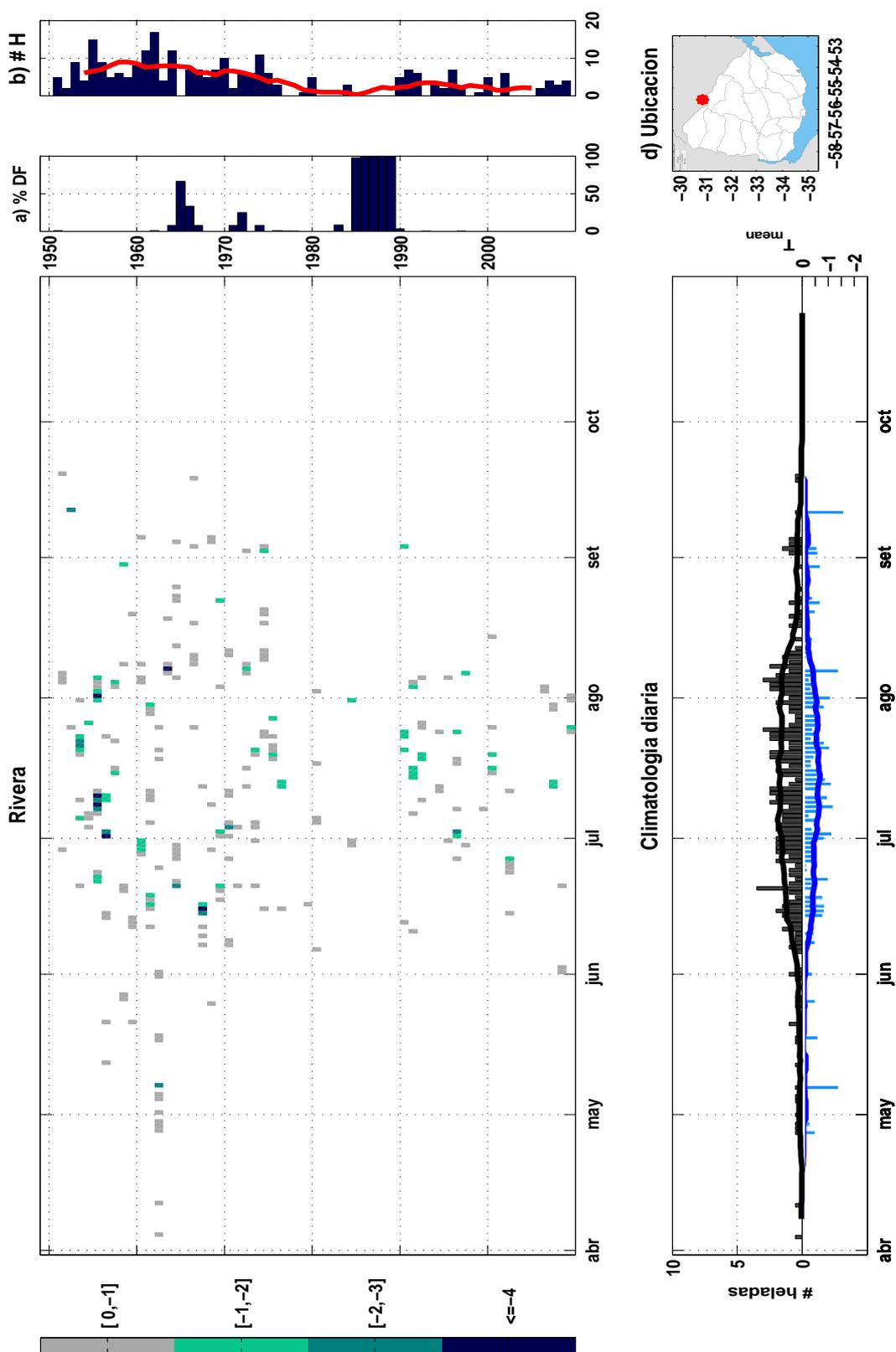


Figura A.9: Rivera, ídem 2.9

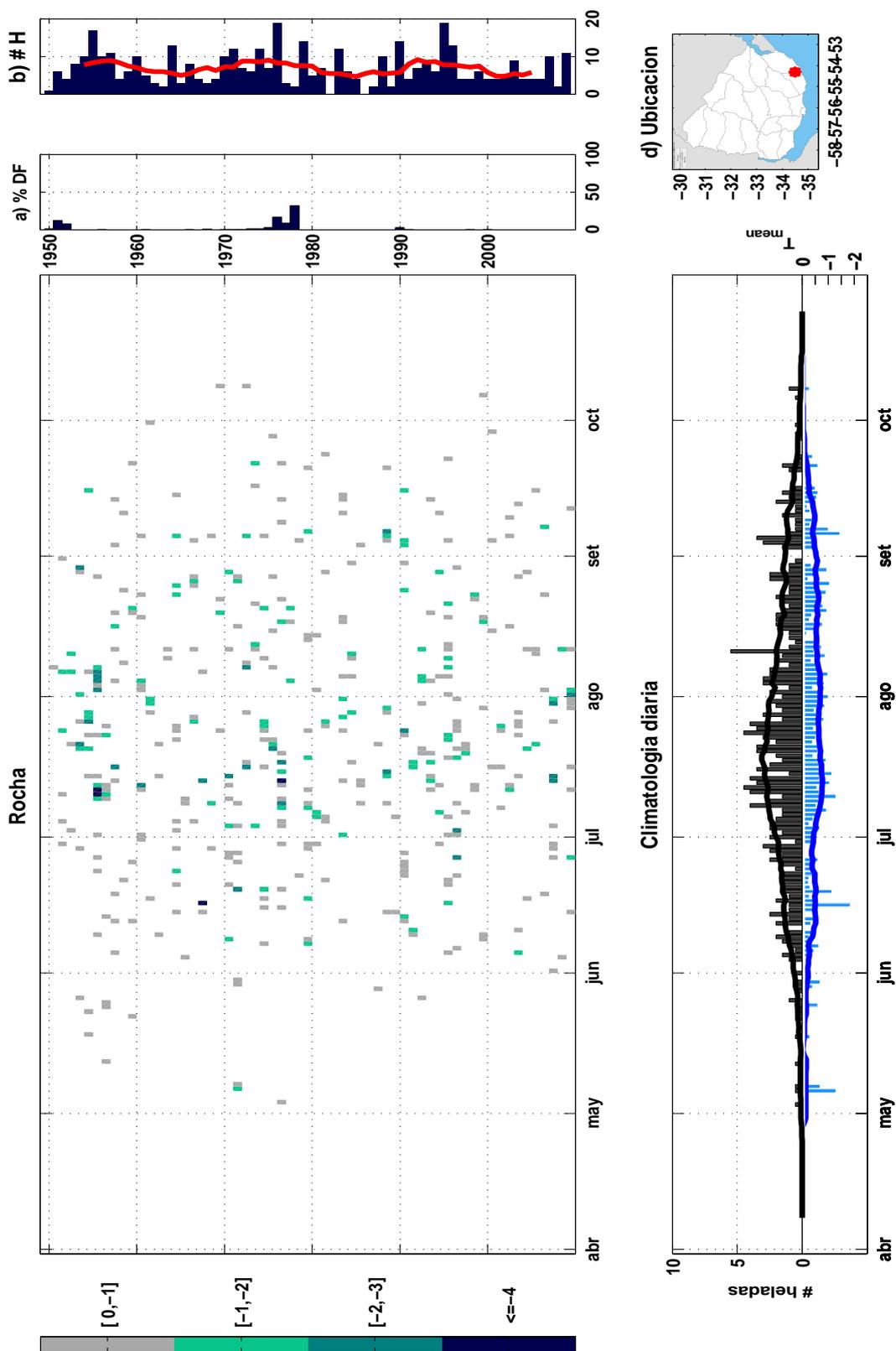


Figura A.10: Rocha, idem 2.9

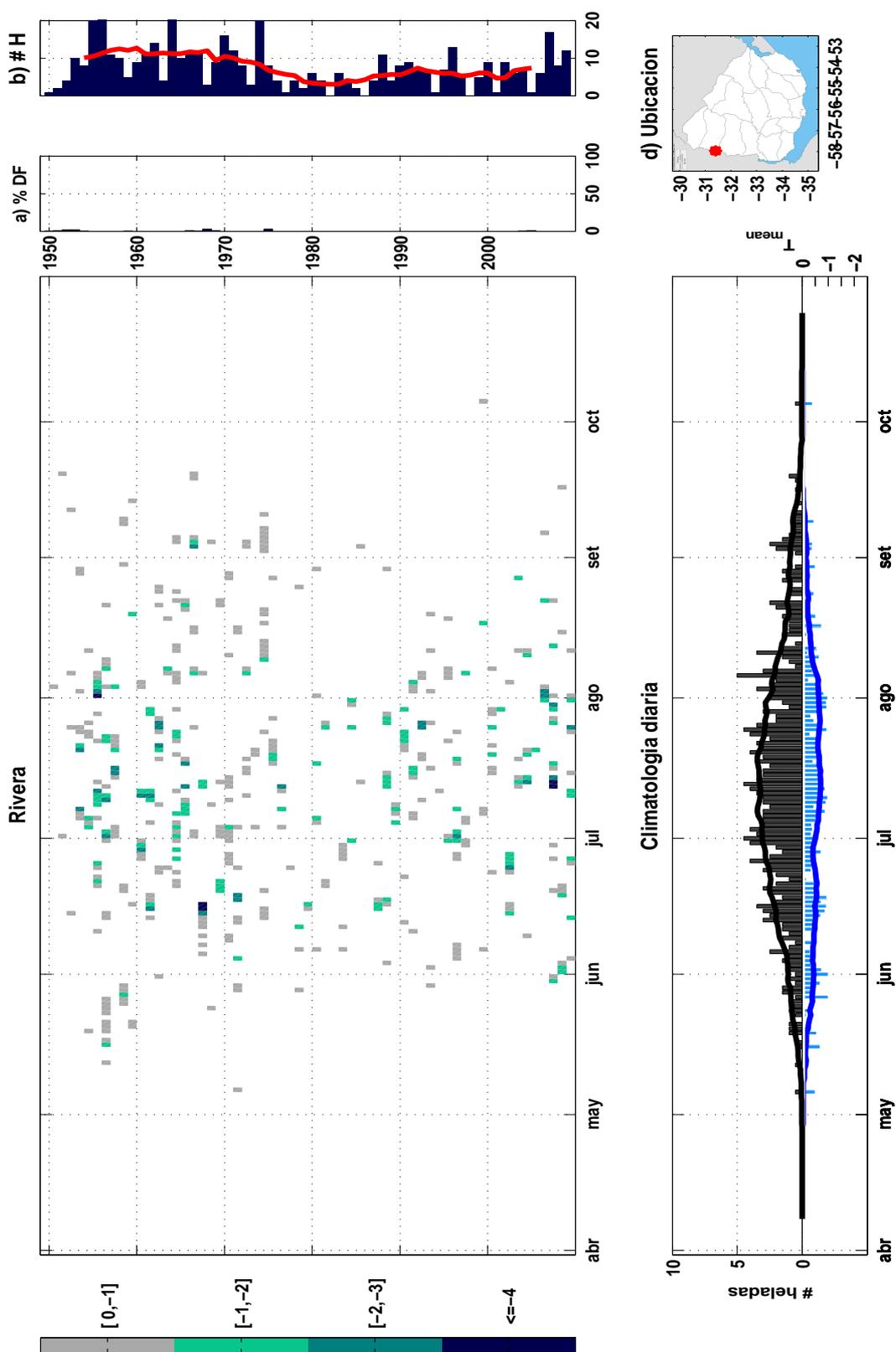


Figura A.11: Salto, idem 2.9