

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**Evaluación del efecto climático sobre la estabilidad estructural del arbolado
urbano de Montevideo**

por

Jorge PÉREZ CASAS

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2024**

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
“Creative Commons **Reconocimiento**”.



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. For. (Dra.) Ana Paula Coelho

Tribunal:

Ing. Agr. Alfonso Arcos

Ing. Agr. (Mag.) Emilio Terrani

Fecha:

18 de diciembre de 2024

Estudiante:

Jorge Pérez Casas

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido parte de este importante proceso en mi vida académica.

En primer lugar, agradezco a Ana Paula mi directora de tesis, por su invaluable guía, motivación y apoyo.

Agradezco también a mis profesores y compañeros. Gracias por fomentar un ambiente de interés, colaboración e inspiración.

Un agradecimiento a mi familia, Camila y Santiago, mis hijos, a mis abuelas que me han inculcado el amor por la naturaleza, y especialmente a Raquel, mi madre, a Grisel, mi tía, quienes siempre han estado a mi lado, brindándome amor y apoyo incondicional. Su aliento me ha motivado a perseverar y seguir adelante en este camino.

Finalmente, a Dinorah, Analhí, Sara, Ricci, y todas las personas que de alguna manera contribuyeron a este trabajo, su colaboración ha sido fundamental para la realización de esta tesis.

Gracias a todos

“El mejor momento para plantar un árbol fue hace 20 años. El segundo mejor momento es ahora” (Proverbio chino).

TABLA DE CONTENIDO

Página de aprobación.....	3
Agradecimientos.....	4
Lista de tablas y figuras.....	7
Resumen.....	9
Abstract.....	10
1. Introducción.....	11
2. Revisión bibliográfica.....	12
2.1. Estabilidad estructural de los arboles urbanos.....	12
2.2. Efectos del clima sobre la estabilidad arbórea.....	13
2.3. Restricciones al desarrollo.....	15
2.4. Caracterización de vientos extremos.....	16
2.5. Beneficios del arbolado.....	20
2.6. Diservicios del arbolado.....	22
2.7. Costos de mantenimiento.....	24
2.8. Riesgo del arbolado.....	26
2.9. Especies frecuentes.....	27
2.9.1. Breve descripción de las principales especies.....	28
2.9.2. Estado vegetativo.....	32
3. Materiales y métodos.....	33
3.1. Área de estudio y período.....	33
3.2. Procesamiento de las denuncias.....	34
3.3. Datos meteorológicos.....	36
4. Resultados y discusión.....	38
4.1. Estudio de denuncias por género/familia.....	44
4.2. Caracterización y descripción de temporales.....	49
4.2.2. Ciclones extratropicales.....	50
4.2.2.1. Temporal del 18 y 19 de septiembre de 2012.....	50
4.2.2.2. Temporal del 22-23 de octubre de 2012.....	56
4.2.2.3. Temporal del 13 y 14 de setiembre de 2016.....	61
4.2.2.4. Temporal del 27 de octubre de 2016.....	65
4.2.2.5. Temporal del 5 de febrero de 2017.....	69

4.2.3. Tormentas convectivas.....	73
4.2.3.1. Temporal del 14 de diciembre de 2015.....	74
4.2.3.2. Temporal del 3 de enero de 2017	78
4.3. Análisis comparativo de eventos climáticos	83
4.4. Recomendaciones	87
5. Conclusiones	89
6. Bibliografía	91

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1 <i>Beneficios del arbolado</i>	21
Tabla 2 <i>Diservicios del arbolado</i>	23
Tabla 3 <i>Denuncias de caída de árboles y ramas, agrupadas por evento</i>	39
Tabla 4 <i>Denuncias por Municipio</i>	41
Tabla 5 <i>Arbolado de Montevideo por Municipio (2005-2008)</i>	42
Tabla 6 <i>Denuncias por Centro Comunal Zonal</i>	44
Tabla 7 <i>Denuncias de caída de árboles por grupo</i>	45
Tabla 8 <i>Tasa de caída</i>	47
Tabla 9 <i>Temporales más relevantes</i>	50
Tabla 10 <i>Registro de viento del 19/9/2012, Carrasco</i>	51
Tabla 11 <i>Registro de anemómetros en Terminal Cuenca del Plata 3/1/2017</i>	81
Tabla 12 <i>Características comparadas de ciclones extratropicales</i>	85
Figura 1 <i>Ciclón Extratropical</i>	17
Figura 2 <i>Formación de tormentas convectivas</i>	18
Figura 3 <i>Tormenta Convectiva – corriente descendente</i>	19
Figura 4 <i>Resultado de las interferencias locales en el viento</i>	20
Figura 5 <i>Costos y beneficios hipotéticos durante la vida útil de un árbol</i>	25
Figura 6 <i>Proporción de especies cultivadas en las aceras de Montevideo</i>	28
Figura 7 <i>Estado vegetativo por género, familia o grupo</i>	32
Figura 8 <i>Distribución de árboles y habitantes</i>	33
Figura 9 <i>Sistema de información geográfica</i>	35
Figura 10 <i>Denuncias de caída de árboles</i>	40
Figura 11 <i>Denuncias agrupadas por mes</i>	41
Figura 12 <i>Localización de denuncias agrupadas por CCZ</i>	43
Figura 13 <i>Distribución de géneros con alta tasa de caída</i>	49
Figura 14 <i>Gráfico del temporal del 18 y 19/9/2012</i>	52
Figura 15 <i>Temporal 18 y 19/9/2012. Detalle del evento</i>	53
Figura 16 <i>Denuncias de caída de árboles en temporal del 18 y 19/9/2012</i>	54
Figura 17 <i>Tasa de Caída Temporal 18 y 19 set 2012 por CCZ</i>	54
Figura 18 <i>Tasa de caída de 18/9/2012 por género</i>	55

Figura 19	<i>Gráfico del temporal del 22/10/2012</i>	57
Figura 20	<i>Temporal del 22/10/2012 – detalle del evento</i>	58
Figura 21	<i>Denuncias de caída de árboles por CCZ - 22/10/2012</i>	59
Figura 22	<i>Tasa de caída temporal 22/10/2012</i>	60
Figura 23	<i>Denuncias de caída de árboles por CCZ - 13/9/2016</i>	61
Figura 24	<i>Gráfico del temporal del 13/9/2016</i>	62
Figura 25	<i>Temporal del 13/9/2016 - detalle del evento</i>	63
Figura 26	<i>Tasa de caída temporal 13/9/2016</i>	64
Figura 27	<i>Enorme ciclón extratropical sobre la provincia de Buenos Aires</i>	64
Figura 28	<i>Denuncias de caída de árboles por CCZ - 27/10/2016</i>	65
Figura 29	<i>Gráfico del temporal del 27/10/2016</i>	66
Figura 30	<i>Temporal del 27/10/2016 - detalle del evento</i>	67
Figura 31	<i>Tasa de caída temporal 27/10/2016</i>	68
Figura 32	<i>Imagen satelital 27/10/2016</i>	69
Figura 33	<i>Denuncias de caída de árboles por CCZ - 5/2/2017</i>	70
Figura 34	<i>Gráfico del temporal del 5/2/2017</i>	71
Figura 35	<i>Temporal del 5/2/2017 – detalle del evento</i>	72
Figura 36	<i>Tasa de caída Temporal 5/2/2017</i>	72
Figura 37	<i>Denuncias de caída de árboles por CCZ - 14/12/2015</i>	74
Figura 38	<i>Gráfico del temporal del 14/12/2015</i>	75
Figura 39	<i>Tasa de caída temporal 14/12/2015</i>	76
Figura 40	<i>Imagen satelital 14/12/15</i>	77
Figura 41	<i>Denuncias de caída de árboles en temporal del 3/1/2017</i>	78
Figura 42	<i>Gráfico del temporal del 3/1/2017</i>	79
Figura 43	<i>Gráfico del temporal del 3/1/2017. Detalle del evento</i>	80
Figura 44	<i>Tasa de caída temporal 3/1/2017</i>	81
Figura 45	<i>CCZ 1, Inventario de árboles</i>	82
Figura 46	<i>Registros del temporal de 3/1/2017</i>	83
Figura 47	<i>Comparación de temporales (ciclones)</i>	84

RESUMEN

Este estudio investiga los efectos en el arbolado urbano de Montevideo ante eventos climáticos extremos, particularmente fuertes vientos. El objetivo es identificar especies más adaptadas, y aquellas con menor resistencia con el fin de optimizar la gestión urbana. La investigación combina análisis de datos meteorológicos y el procesamiento de denuncias de caídas. Se considera la influencia de la especie arbórea y la intensidad del viento en la estabilidad. El análisis caracteriza eventos climáticos, diferenciando ciclones extratropicales y tormentas convectivas, para determinar su impacto diferencial en la tasa de caídas. Los resultados muestran una correlación significativa entre la intensidad de los eventos meteorológicos y el número de árboles caídos. El análisis de denuncias, agrupadas por género/familia, ubicación geográfica, y periodo temporal, identifica especies vulnerables. Se analizan temporales significativos, presentando datos de velocidad del viento y mapas que ilustran la distribución de las caídas. Entre las especies resistentes se destacan *Fraxinus*, *Platanus*, *Tipuana*, *Melia* y *Acer*, mientras que los géneros *Cupressus*, *Pinus*, *Eucalyptus*, y *Schinus* mostraron mayor vulnerabilidad. La presencia de lluvia durante eventos de viento incrementó significativamente la tasa de caídas. Se observó una mayor probabilidad de caídas en los CCZ 4, 11, 17 y 18, mientras que el 6, 1, 14 y 8 mostraron tasas más bajas. La estacionalidad también influyó en la frecuencia de caídas. Las implicaciones para la gestión del arbolado urbano de Montevideo son significativas. Se recomienda priorizar la plantación de especies resilientes. Es crucial evitar la plantación de *Cupressus*, *Eucalyptus*, *Pinus*, *Schinus* y *Salix* debido a su vulnerabilidad y otras características no deseadas. Se debe implementar un programa de inspecciones y monitoreo para un esquema de mantenimiento regular. Es necesario investigar las causas de las caídas para identificar factores que contribuyen a la debilidad estructural. La integración del arbolado en el diseño urbano debe asegurar espacios adecuados para el crecimiento radicular y aéreo, considerando su interacción con la infraestructura. Se recomiendan campañas de sensibilización y capacitación del personal de arboricultura sobre mejores prácticas. La colaboración interinstitucional y un registro de datos actualizado son cruciales para la toma de decisiones informadas. Finalmente, se sugieren investigaciones adicionales para profundizar en el comportamiento de las especies y su adaptación a condiciones climáticas cambiantes. Las limitaciones metodológicas, como la imprecisión en la identificación de especies y la utilización de datos meteorológicos externos al área de estudio, deben ser consideradas al interpretar los resultados.

Palabras clave: arbolado urbano, tormentas, caída de árboles, estabilidad estructural, vientos extremos

ABSTRACT

This study investigates the effects on urban trees in Montevideo of extreme weather events, particularly strong winds. The objective is to identify more adapted species, and those with less resistance in order to optimize urban management. The research combines analysis of meteorological data and the processing of reports of tree falls. The influence of the tree species and the intensity of the wind on stability is considered. The analysis characterizes climatic events, differentiating between extratropical cyclones and convective storms, to determine their differential impact on the rate of falls. The results show a significant correlation between the intensity of meteorological events and the number of fallen trees. The analysis of reports, grouped by genus/family, geographic location, and time period, identifies vulnerable species. Significant storms are analyzed, presenting wind speed data and maps illustrating the distribution of falls. Among the resistant species, *Fraxinus*, *Platanus*, *Tipuana*, *Melia* and *Acer* stand out, while the genera *Cupressus*, *Pinus*, *Eucalyptus*, and *Schinus* showed greater vulnerability. The presence of rain during wind events significantly increased the rate of falls. A higher probability of falls was observed in CCZs 4, 11, 17 and 18, while 6, 1, 14 and 8 showed lower rates. Seasonality also influenced the frequency of falls. The implications for the management of urban trees in Montevideo are significant. It is recommended to prioritize the planting of resilient species. It is crucial to avoid the planting of *Cupressus*, *Eucalyptus*, *Pinus*, *Schinus* and *Salix* due to their vulnerability and other undesirable characteristics. An inspection and monitoring program should be implemented for a regular maintenance scheme. It is necessary to investigate the causes of falls to identify factors that contribute to structural weakness. The integration of trees into urban design should ensure adequate spaces for root and aerial growth, considering their interaction with infrastructure. Awareness campaigns and training of arboricultural staff on best practices are recommended. Inter-institutional collaboration and an updated data registry are crucial for informed decision-making. Finally, additional research is suggested to delve deeper into species behavior and their adaptation to changing climatic conditions. Methodological limitations, such as imprecision in species identification and the use of meteorological data external to the study area, should be considered when interpreting the results.

Keywords: urban trees, storms, falling trees, structural stability, extreme winds

1. INTRODUCCIÓN

El arbolado urbano cumple un rol esencial en la configuración y calidad de vida de los entornos metropolitanos, contribuyendo no solo a la estética y el paisajismo, sino también proporcionando beneficios ecológicos, sociales y económicos. En Montevideo, como en muchas ciudades, el cambio climático ha incrementado la frecuencia y severidad de fenómenos climáticos extremos, como tormentas y vientos intensos, que ponen en riesgo la estabilidad y salud del arbolado. Estos eventos desafían la resiliencia de los árboles, exponiéndolos a condiciones que pueden llevar a fallas estructurales y daños a la infraestructura urbana.

Estudiar la respuesta del Arbolado de Montevideo a eventos climáticos extremos resulta decisivo para garantizar la seguridad y sostenibilidad del entorno urbano, mitigando el impacto de los fenómenos climáticos adversos. Comprender cómo factores como la especie, las condiciones del suelo urbano y las características meteorológicas afectan la estabilidad de los árboles permitirá desarrollar estrategias de manejo más efectivas.

Esta investigación tiene como objetivo evaluar la respuesta de las especies arbóreas en Montevideo frente a condiciones de estrés climático, identificando tanto las especies más vulnerables como las más resistentes. A través de la recopilación de datos meteorológicos, el análisis de denuncias de caídas de árboles y una revisión de la literatura existente, este estudio busca proponer recomendaciones de gestión y planificación del arbolado urbano que promuevan la seguridad y sostenibilidad en un contexto de cambio climático.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Cada año, los fenómenos naturales drásticos ocasionan daños significativos, especialmente en las zonas costeras. A pesar de los grandes avances en el conocimiento y monitoreo atmosférico, estos fenómenos siguen siendo en gran medida impredecibles. Se puede asegurar que los daños irán en aumento, dado el crecimiento de las urbanizaciones, la densidad poblacional en zonas costeras, y el efecto del cambio climático (Escalante & Colunga, 2003).

En este contexto, los estudios de vulnerabilidades arquitectónicas, socioeconómicas y ecológicas son fundamentales para entender y mitigar los riesgos en nuestras comunidades. Los efectos en la vegetación urbana durante tormentas pueden generar impactos en la seguridad de las personas, daños materiales y económicos, así como en la restitución de estructuras y servicios.

Por lo tanto, es crucial desarrollar modelos que permitan estimar con mayor precisión la carga de viento real sobre la vegetación arbórea en el entorno urbano de Montevideo. Esto sentará las bases para implementar estrategias de gestión del arbolado urbano más robustas y efectivas, mitigando los riesgos asociados a eventos meteorológicos extremos.

2.1. ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DE LOS ARBOLES URBANOS

La estabilidad del arbolado urbano se refiere a la probabilidad baja de que el número de árboles en buen estado disminuya en el futuro de manera que afecte su valor para la comunidad y el mantenimiento necesario para su remoción y reemplazo (Richards, 1983).

En entornos urbanos, la estabilidad estructural de los árboles es crucial ya que deben resistir múltiples fuerzas externas. Diversos estudios subrayan los factores que afectan esta estabilidad, y que eventualmente pueden predisponer a los árboles a fallas estructurales (Duryea & Kampf, 2007; Escalante & Colunga, 2003; Mattheck & Breloer, 1994; Rizzardi & Calvo, 2018; Terrani Texeira, 2014).

Los árboles, como organismos de gran tamaño, desarrollan estructuras que elevan sus hojas sobre otras plantas para captar la luz solar esencial para su crecimiento. Para lograrlo, deben enfrentarse a diversas cargas mecánicas, como su propio peso, la fuerza del viento y en algunos lugares, el peso de la nieve. Los árboles poseen una estructura sofisticada que combina resistencia, flexibilidad y rigidez, lo que les permite adaptarse a su entorno y modificar su diseño en respuesta a las condiciones ambientales (Vargas, 2017).

La forma y estructura de una planta están determinadas por su naturaleza y la disposición de sus diferentes partes. Esto implica encontrar un equilibrio entre los procesos internos de crecimiento y las limitaciones externas impuestas por el entorno (Barthélémy & Caraglio, 2007). Para la estabilidad mecánica, una planta necesita una cantidad mínima de tejido para soportar las cargas del ambiente.

El modo de falla más probable de un tallo es la flexión elástica; es decir, el árbol está mejor preparado para resistir compresiones que flexiones, o sea que resiste mejor su propio peso que las cargas laterales como el viento (Vargas-Silva, 2019).

El viento aplica fuerza en la parte aérea que es flexible, mientras que las raíces y el suelo actúan como anclaje. Induce en las plantas una carga dinámica transitoria, lo que provoca modificaciones permanentes en su forma general. Estas condiciones afectan tanto la anatomía como la densidad de la madera, generando cambios biomecánicos a nivel arquitectónico (Vargas-Silva, 2019)

Las raíces desempeñan funciones esenciales, como el anclaje, la absorción de agua y minerales, así como la síntesis de compuestos nitrogenados y reguladores de crecimiento (Kramer & Boyer, 1995).

En los árboles, las raíces presentan un notable desarrollo, con la capacidad conformar una placa de raíces poco profunda (300 a 600 mm) y extenderse de manera amplia y radial en cualquier dirección, a menudo a grandes distancias, mucho más allá de la proyección vertical del dosel. Este sistema radicular extenso les permite mantener la estabilidad y proveerse de agua y, lo cual implica una estrecha relación con el suelo que las sostiene y rodea (Rizzardi & Calvo, 2018).

Las raíces que desarrollan un crecimiento secundario lignificado, con estructura rígida y perenne, son las encargadas del anclaje y de la formación de la red del sistema radicular, alcanzando generalmente profundidades de hasta dos metros (Kokoreva, 1996).

El crecimiento radicular puede encontrar obstáculos que limiten su desarrollo: resistencia mecánica del suelo, escasa aireación, bajo o elevado pH, exceso de elementos tóxicos (ej.: aluminio) y competencia por la presencia de otras plantas. Particularmente, en espacios urbanos el entorno subterráneo con el que cuentan las raíces suele ser hostil y restrictivo para el crecimiento, lo cual promueve un desarrollo pobre y poco saludable (Rizzardi & Calvo, 2018).

2.2. EFECTOS DEL CLIMA SOBRE LA ESTABILIDAD ARBÓREA

Diversos estudios han identificado una serie de factores que pueden predisponer a la falla estructural de los árboles urbanos:

El clima juega un papel central en el establecimiento, el crecimiento, la senescencia y, particularmente, el fracaso de los árboles. El viento es la más persistente de las fuerzas naturales dañinas a las que está sometido cualquier árbol o bosque. El calor, las heladas, la lluvia, el granizo y la nieve también afectan, pero el daño causado por estos agentes es ocasional (Alvarado et al., 2012; Bozzo, 2021; Escalante & Colunga, 2003).

Las plantas terrestres se han adaptado para sobrevivir bajo una variedad de vientos, esto implica cambios en la composición química, la estructura física y la morfología en todas las escalas, desde la célula hasta la planta completa.

Las plantas responden a la estimulación mecánica, como el viento o el tacto, a través del proceso de tigmomorfogénesis, en definitiva, esto permite a las plantas adaptarse y optimizar su estructura frente a estímulos mecánicos, mejorando su capacidad para sobrevivir en entornos desafiantes reorientando y reconfigurando sus copas (Jaffe, 1973; Langer et al., 2022).

A medida que toda la copa se dobla y cambia de forma se vuelve más aerodinámica, lo que reduce la resistencia. En condiciones de vientos demasiado fuertes, oscilan hasta que fallan. La forma de disipar la energía puede ser por pérdida de hojas, frutos o ramas enteras. Los árboles que pierden la mayoría de las hojas sobreviven mejor a las tormentas, y el fenómeno es más frecuente en los árboles más grandes, posiblemente porque son menos flexibles (Moore, 2014).

La compartimentación de la energía de la tensión mecánica, provocada por el viento, en una parte específica de la planta permite una amortiguación eficiente de la oscilación y puede actuar como fusible mecánico. Esto hace posible que las ramas se rompan antes que el tallo principal, lo que reduce el riesgo de que toda la planta falle (Duryea & Kampf, 2007; Gardiner et al., 2016).

Además de la intensidad y velocidad del viento, hay otros factores que influyen en el daño a los árboles. Entre ellos se encuentran las condiciones ambientales, como la cantidad de precipitación y el tiempo que el viento tarda en afectar la zona. También son relevantes las características de las especies de árboles, así como su edad, salud y estructura (Duryea et al., 2007).

Según Duryea et al. (2007), en un estudio de huracanes, a medida que aumenta la velocidad del viento, es más probable que los árboles sufran daños, es decir, que se desarraiguen, se quiebren o se inclinen. Peltola (1996) afirma que ninguna especie de árbol puede sobrevivir a tormentas sin sufrir daños si la velocidad media del viento, durante un período de 10 minutos, supera los 100 km/h cerca de la parte superior del dosel.

Además, a velocidades del viento superiores a 74 km/h, es común que se produzcan caídas de árboles de manera generalizada (Koeser et al., 2023). Por su parte, Peltola (2006) modeló la estabilidad mecánica de diferentes especies arbóreas bajo cargas de viento. Sus resultados indicaron que velocidades de 72 a 90 km/h ya podían causar daños estructurales severos, especialmente en árboles con características como troncos delgados y copas grandes.

Se pueden observar grandes diferencias en el riesgo de daño por viento entre regiones y lugares que difieren en topografía y clima eólico (Quine, 2000). Los árboles que crecen en calles situadas entre edificios altos son más propensos a la caída debido a la canalización de los vientos. Estas estructuras urbanas intensifican las ráfagas, lo que aumenta el riesgo de daños (Corso, 2024).

Las tormentas, especialmente aquellas que involucran lluvias torrenciales y vientos fuertes, a menudo resultan en un gran número de árboles dañados. Puede haber un aumento en las llamadas de servicio para el mantenimiento de rutina y otras intervenciones en los árboles, ya que después de un evento de tormenta las personas toman mayor conciencia de los riesgos asociados a los árboles (Moore, 2014).

2.3.RESTRICCIONES AL DESARROLLO

Los elementos que se considerarán a continuación incluyen las características del sitio, como la profundidad y composición del suelo, su compactación y el nivel freático, así como las condiciones del bosque urbano, como la densidad y la composición general de la copa de los árboles, los cuales juegan un papel crucial en la resistencia de estos ante las inclemencias del viento (Duryea et al., 2007; Peltola, 2006).

Por otro lado, Sinnett et al. (2008) demostraron cómo el limitado espacio y volumen de suelo disponible para el crecimiento de los árboles en entornos urbanos altamente modificados, como sitios de relleno sanitario restaurados, puede afectar negativamente su desarrollo radicular y, en consecuencia, su anclaje y estabilidad. En sus evaluaciones, los árboles plantados en estos suelos restringidos presentaban sistemas radiculares más superficiales y desproporcionados, lo cual los hacía más propensos a volcar durante eventos de viento intenso.

El nivel freático elevado también puede comprometer el anclaje de los árboles, haciéndolos más susceptibles al vuelco. Cuando el nivel de agua subterránea se encuentra cerca de la superficie, el sistema radicular tiene menor capacidad de penetración y extensión horizontal, limitando su estabilidad. Se dan zonas de anaerobiosis donde las raíces no se pueden desarrollar por asfixia (Rizzardì & Calvo, 2018).

La capacidad de adaptación de los árboles a las condiciones locales es fundamental. Aunque los árboles nativos suelen estar mejor preparados para su entorno y para la presencia de plagas y enfermedades en hábitats naturales, el ambiente urbano presenta desafíos específicos que pueden afectar su desempeño y resistencia. En este contexto, las especies nativas no siempre conservan su ventaja en términos de estabilidad estructural y resistencia a condiciones adversas, especialmente cuando se comparan con algunas especies exóticas que responden mejor a estos entornos modificados (Dunster et al., 2017). El ambiente urbano puede resultar más estresante para los árboles, haciéndolos más susceptibles a enfermedades. La presencia de plagas y patógenos es un factor predisponente importante (Pokorny et al., 2003).

Las características intrínsecas de la madera, como su densidad, módulo de elasticidad y módulo de rotura, también influyen en la resistencia estructural de los árboles (Duryea et al., 2007).

Adicionalmente, la forma de la copa es determinante, siendo las copas ahusadas y flexibles, así como las copas densas, más resistentes a los vientos fuertes en comparación con las copas globosas o abiertas (Duryea et al., 2007).

La senescencia y los problemas de sanidad también son elementos clave en la estabilidad. Los árboles de mayor edad son más susceptibles a insectos y enfermedades, lo que debilita su estructura y flexibilidad (Matheny & Clark, 1998). Asimismo, la presencia de pudrición en raíces, tallos o ramas muertas aumenta significativamente la vulnerabilidad de los árboles a la falla estructural (Pokorny et al., 2003).

Otro factor relevante es la capacidad de defoliación de las especies arbóreas. Se ha observado que los árboles que pierden sus hojas de manera más efectiva pueden tolerar mejor los vientos fuertes, ya que reducen su resistencia al viento (Duryea et al., 2007).

En entornos urbanos, los factores que afectan la intensidad y tipo de daño en las plantas se ven agravados por errores humanos, como la elección inadecuada de especies y sitios, técnicas de plantación deficientes, espacio insuficiente para el crecimiento, daños a las raíces por construcciones o escapes subterráneos, y podas mal realizadas (Escalante & Colunga, 2003).

2.4. CARACTERIZACION DE VIENTOS EXTREMOS

Comprender los patrones y características de los vientos en Montevideo, así como su interacción con la vegetación arbórea, es fundamental, con el fin de implementar estrategias de manejo y selección de especies que mejoren la resiliencia del arbolado urbano. Este estudio aborda los principales fenómenos meteorológicos que dan forma al clima de vientos en Uruguay, y analiza cómo estos factores climáticos pueden impactar en la salud y estabilidad de los árboles en el entorno urbano.

El clima de vientos en Uruguay está determinado por los fenómenos meteorológicos regionales, que a su vez son los mismos que dan lugar a variaciones de la temperatura y la precipitación, en referencia a escalas de miles a cientos de kilómetros (Barreiro et al., 2021).

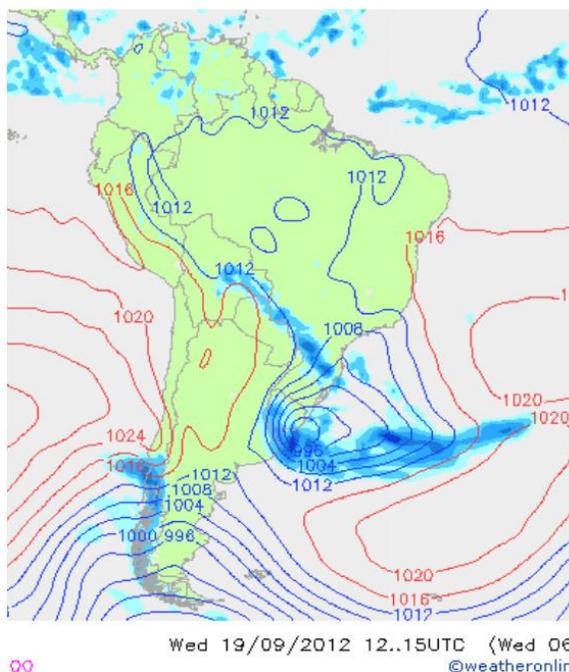
Los vientos extremos en Uruguay son causados por ciclones extra tropicales y tormentas convectivas severas. Las ráfagas de viento más intensas y las mayores velocidades promediadas en 10 min corresponden a eventos no sinópticos, con marcadas características transitorias, y generalmente ocurren durante actividad convectiva intensa (Durañona, 2015).

Los ciclones extratropicales son sistemas de baja presión, de diámetro del orden de cientos a miles de kilómetros, que en el hemisferio sur giran en sentido horario (Figura 1). Su pasaje por un sitio determinado puede demorar desde varias horas a algún día. En algunas situaciones sinópticas pueden intensificarse y ser responsables de la ocurrencia de vientos fuertes. Es común en esos casos que en

Uruguay se alcancen velocidades medias en 10 min del orden de los 100 km/h a 10 m de (Durañona, 2015).

Uruguay pertenece a una de las regiones de mayor generación de ciclones del hemisferio sur. Generalmente estos ciclones se mueven hacia el sureste, y alcanzan su máxima depresión (y sus máximas velocidades en superficie) sobre el océano. Las máximas velocidades provienen usualmente del cuadrante sureste-suroeste. La masa de aire se desplaza fundamentalmente de forma horizontal, y su velocidad no suele variar de manera abrupta ni espacial ni temporalmente (Barreiro et al., 2021).

Figura 1
Ciclón Extratropical



Nota. Tomado de Barreiro et al. (2021).

La Figura 1 muestra un sistema de baja presión, o ciclón extratropical, centrado en el este de Uruguay. Las isóbaras azules indican áreas de baja presión (por debajo de 1014 hPa), mientras que las isóbaras rojas señalan zonas de alta presión (por encima de 1014 hPa). Las regiones sombreadas representan áreas con precipitación muestra un sistema de baja presión, o ciclón extratropical, centrado en el este de Uruguay.

Otro fenómeno meteorológico de gran importancia en la generación de vientos extremos en son las tormentas convectivas. Uruguay se encuentra en la zona con mayor ocurrencia de tormentas convectivas severas en América del Sur, siendo la segunda región del mundo con más formación de estos fenómenos. Mientras que los ciclones pueden generar vientos intensos de larga duración, las

tormentas convectivas se caracterizan por ráfagas de viento de corta duración, pero extrema intensidad (Durañona, 2015).

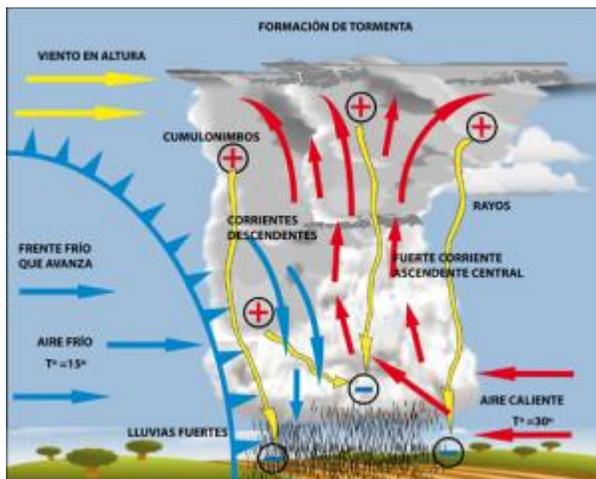
Las tormentas convectivas son fenómenos meteorológicos de gran potencia, caracterizados por el rápido ascenso de masas de aire caliente y húmedo desde las capas inferiores. Se forman cuando el aire húmedo e inestable se eleva debido al calentamiento desigual de la superficie terrestre, al enfriamiento de las capas superiores, a efectos del terreno, al encuentro con masas de aire frío o a vientos convergentes en la superficie (Bonilla, 2018).

Estas tormentas suelen intensificarse y se acompañan de granizo de gran tamaño, lluvias intensas y ráfagas fuertes. Además, pueden generar corrientes descendentes potentes y, en algunos casos, tornados. Estas corrientes descendentes, al impactar con el suelo, se expanden y pueden alcanzar velocidades elevadas a alturas de hasta 100 metros (Figura 2). Suelen producir, en un sitio acotado, vientos intensos que duran desde minutos hasta algunas horas. La intensidad de las velocidades de viento que se registran durante su pasaje va variando mientras éstas se desplazan (Durañona, 2012).

Una corriente descendente se puede modelar como un chorro que, al impactar sobre el suelo, diverge radialmente y tiende a formar un anillo a su alrededor (Figura 3). Este anillo va alejándose del centro del chorro luego de su impacto contra el suelo (Durañona, 2012).

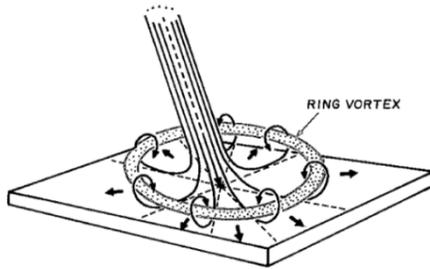
Figura 2

Formación de tormentas convectivas



Nota. Tomado de *Las Tormentas* (2013).

Figura 3
Tormenta Convectiva, corriente *descendente*



Nota. Tomado de Fujita (1985, como se cita en Durañona, 2012).

Durañona (2015) observó que en Uruguay existe una tendencia estacional en las ráfagas de viento y las velocidades medias en 10 minutos, con picos más altos entre octubre y marzo, especialmente en noviembre y febrero, coincidiendo con la actividad convectiva severa. Estas tormentas son responsables de la mayoría de los daños e incidencias por viento, y dominan el clima de vientos extremos, con las ráfagas más intensas y las mayores velocidades promediadas en 10 minutos asociadas a eventos no sinópticos transitorios. Además, tanto las tormentas convectivas intensas como los eventos de viento intenso de escala sinóptica (500-1000 km de escala horizontal) generan sus vientos más fuertes desde el cuadrante suroeste.

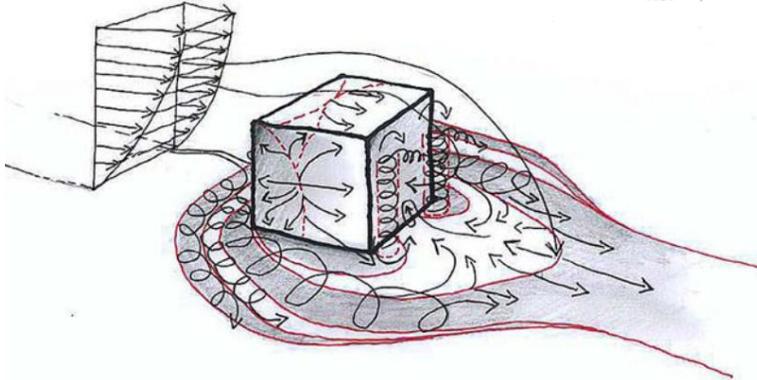
Una vez caracterizados los vientos en términos de estacionalidad, velocidad, dirección y duración, así como su asociación con las lluvias, es fundamental correlacionar los datos de velocidad del viento obtenidos de estaciones meteorológicas regionales, incluso si estas se encuentran alejadas de la zona de estudio, con la fuerza que realmente se ejerce sobre los árboles. Göcke et al. (2018) señalan que es posible utilizar registros de estaciones meteorológicas ubicadas a varios kilómetros de distancia, aunque la calidad de la correlación en cuanto a dirección y velocidad del viento puede variar según las condiciones locales y la topografía.

El viento que impacta un árbol puede diferir del viento regional debido a efectos como el túnel o el refugio proporcionado por otros árboles y la infraestructura cercana. El estudio de los procesos de capa límite son muy importantes ya que estos determinan el movimiento del fluido cuando interacciona con una superficie. Es necesario acotar que la velocidad del viento puede sufrir cambios positivos o negativos, dependiendo de las variaciones locales en la topografía y la rugosidad del terreno (Figura 4).

En una ciudad, por ejemplo, los edificios adyacentes pueden causar efectos de túnel cuando el aire pasa por calles estrechas o se ve obligado a fluir turbulento alrededor de los edificios (Göcke et al., 2018).

Figura 4

Resultado de las interferencias locales en el viento



Nota. Tomado de Bustamante et al. (2014).

Es fundamental comprender cómo se modifica el viento a escala local debido a factores como la rugosidad del terreno, la presencia de edificios y otras estructuras urbanas. Estos efectos de túnel o refugio pueden amplificar o atenuar significativamente la fuerza del viento que realmente experimenta cada árbol o grupos de árboles, en comparación con las mediciones tomadas en estaciones meteorológicas. Por lo tanto, es crucial desarrollar modelos que permitan estimar con mayor precisión la carga de viento real sobre la vegetación arbórea en el entorno urbano de Montevideo.

2.5. BENEFICIOS DEL ARBOLADO

Para mitigar los efectos climáticos adversos en los entornos urbanos, se proponen soluciones basadas en la naturaleza (SbN). Estas buscan crear capacidades de adaptación y resiliencia en ciudades, infraestructuras y entornos urbanos, combinando tecnología con los servicios ecosistémicos naturales. Al implementar SbN, se generan sistemas vivos que favorecen la sostenibilidad ambiental, social y económica de las ciudades (Bozzo, 2021).

La infraestructura verde, compuesta por espacios naturales, ajardinados, tanto públicos como privados, ofrece una variedad de servicios ambientales, sociales y económicos. Estos servicios ecosistémicos son fundamentales para asegurar la integridad de la ciudad, mejorando la habitabilidad y calidad de vida de sus habitantes (Bozzo, 2021). En particular, los árboles urbanos pueden proporcionar una amplia gama de beneficios para el entorno urbano, la calidad de vida y el bienestar de las personas (Nowak et al., 1998).

A continuación, en la Tabla 1, se listan las funciones del arbolado y su impacto positivo a nivel social, económico, cultural y ambiental.

Tabla 1
Beneficios del arbolado

Funciones	Comentarios
Encuentro social/personal	Es una de las funciones principales del espacio verde como espacio público. Puede hacer del ambiente urbano un lugar más placentero para vivir, trabajar y utilizar el tiempo libre, patrones más saludables de juego infantil, más uso de los espacios comunes del vecindario
Estéticas	Embellecimiento del paisaje
Contacto con la naturaleza	Percepción, entendimiento y valorización de la naturaleza
Sociales	Aumenta el sentido de pertenencia a la comunidad, reducción de la violencia y conflictividad, reducción de criminalidad; estos efectos son resultado de la presencia de personas en el ámbito público
Salud	La actividad física al aire libre promueve la salud y la reducción de estrés, aumentan la satisfacción de la vida diaria y dan un mayor sentido, de relación significativa, entre la gente y el medio natural. Proveen experiencias emocionales y espirituales significativas
Regulación de la escorrentía y escurrimiento superficial	Intercepción y absorción de agua de lluvia, reducción de erosión y contaminación de corrientes de agua. Ayuda a los sistemas de drenaje reduciendo los caudales totales e instantáneos
Regulación de la temperatura	Absorción de radiación solar, absorción de energía térmica por evaporación de agua
Regulación de la humedad	Las masas vegetales aumentan la humedad ambiental por evapotranspiración.
Producción de O ₂ / Absorción de CO ₂	Contribuye a la renovación de aire en capas bajas
Filtro de radiaciones	Reflejan y absorben radiaciones que pueden ser nocivas para la salud humana
Absorción de polvo y contaminantes	Absorción y metabolización de sustancias contaminantes atmosféricos, retención de sólidos en suspensión
Amortiguación del ruido	Las hojas y ramas reducen el sonido transmitido, principalmente dispersándolo
Protección del viento	Reducción de la velocidad del viento, reducción de sólidos en suspensión, reducción de necesidad de calefacción

Protección solar	Sombreado, reducción de temperatura, aumento del confort térmico, reducción de islas de calor, reducción de uso de energía en acondicionamiento de aire, protección de estructuras, reduce la fatiga y deformación permanente de pavimentos, reduce la pérdida de aceites por volatilización del asfalto, reduce la contaminación del aire
Reservorio de biodiversidad	hábitat, alimentos y protección a plantas, animales, etc.
Estructuración del espacio urbano	La utilización de elementos blandos vegetales (vallados, setos) puede ayudar en la señalización y delimitación de espacios o de carriles
Elementos de conexión intraurbana movilidad.	Constituyen elementos de referencia en los recorridos urbanos, acompañando a los diferentes flujos de movilidad
Económico/inmobiliario	El mayor valor de las propiedades cercanas a áreas verdes refleja el beneficio que el mercado percibe.

Nota. Elaborado con base en Benedict y McMahon (2006), Nowak et al. (1998), Pérez Caicedo y Lozano Osorio (2015), Pérez Campaña y Talavera García (2008), Priego González de Canales (2002).

2.6. DISERVICIOS DEL ARBOLADO

Tanto los servicios como los diservicios de los ecosistemas son conceptos inherentemente antropogénicos, que ponen énfasis en la valoración humana de las propiedades y funciones de los ecosistemas (Lyytimäki, 2017). Es fundamental la comprensión adecuada de la amplia gama de beneficios, costos y resultados esperados de las opciones de manejo de la vegetación urbana, así como las interacciones entre ellos.

Los árboles urbanos pueden producir diferentes tipos de perjuicios según su ubicación, la fase de crecimiento y la intensidad del mantenimiento. En un nivel general, los diservicios del ecosistema pueden definirse como las funciones, procesos y atributos generados por el ecosistema que resultan en impactos negativos percibidos o reales en el bienestar humano (Shackleton et al., 2016).

En la Tabla 2 se muestra un listado de diservicios relevantes a tener en cuenta en los programas de arboricultura urbana.

Tabla 2
Diservicios del arbolado

Problemas	Comentarios
Estéticos	<p>Árboles percibidos como feos (por ejemplo, árboles no manejados con ramas muertas, árboles que sufren invasiones de plagas, podas excesivas, deformidades)</p> <p>Árboles en lugares inadecuados (bloqueo de vistas desde las ventanas o que distorsionan los conjuntos arquitectónicos).</p> <p>Efectos indirectos del crecimiento de los árboles que disminuyen el valor estético de las estructuras construidas (pintura de paredes, manchas por frutos y hojas)</p> <p>Olores desagradables (frutos, flores etc.)</p> <p>Árboles que albergan especies que producen malestar estético (p. Ej., Excrementos de pájaros y cantos de pájaros no deseados u otro comportamiento auditivo)</p>
Seguridad y protección	<p>Riesgos físicos directos (tropiezos, resbalones, bloqueo de drenaje, caída de árboles o ramas, bloqueo de la visibilidad. Refugio de murciélagos, roedores, insectos etc.</p> <p>Lugares de miedo relacionados con la mala conducta humana (por ejemplo, riesgo percibido de delitos nocturnos, perros de compañía no controlados)</p> <p>Interferencia visual con señales de tránsito, carteles, luminarias etc.</p>
Salud	<p>Reacciones alérgicas (polen, alérgenos volátiles etc.)</p> <p>Irritación por fibras (ej.: <i>Platanus</i>)</p> <p>Producción de contaminantes del aire o precursores de contaminantes del aire que afectan la salud, como los compuestos orgánicos volátiles.</p> <p>Hábitat de vectores de enfermedades</p> <p>Lesiones asociadas a tareas de mantenimiento</p>
Económicos	<p>Costos directos causados por plantar, mantener y remover la cobertura vegetal, eliminar especies no deseadas (por ejemplo, malezas, aves que anidan en lugares inapropiados, especies invasoras)</p> <p>Levantamiento y roturas de aceras, pavimentos estructuras edilicias</p> <p>Costos indirectos causados por restricciones de uso de la tierra.</p> <p>Problemas de movilidad e infraestructura. Árboles y parques urbanos que impidan el transporte y el movimiento rápidos y cómodos, especialmente el uso de transporte motorizado o el movimiento de personas con discapacidad o ancianos.</p> <p>Raíces y hojas que provocan obstrucciones en las tuberías de alcantarillado, ramas que provocan daños en los cables</p>

Ambientales	<p>Compuestos orgánicos volátiles biogénicos y emisiones secundarias de aerosoles de árboles, emisiones de carbono y metano por descomposición que afectan la calidad del aire y el cambio climático.</p> <p>Aumento de los niveles de contaminación debido a la reducción del intercambio de aire (bloqueo del viento).</p> <p>Desplazamiento de especies nativas e introducción de especies invasoras.</p> <p>Generación de residuos voluminosos de podas</p>
Energéticos	<p>Disminución de las posibilidades de aprovechar la luz solar debido a la sombra.</p> <p>Consumo de energía, uso de recursos y contaminación por actividades de mantenimiento</p>

Nota. Elaborado con base en Lyytimäki et al. (2008), Escobedo et al. (2011), Gómez-Baggethun y Barton (2013), Delshammar et al. (2015), von Döhren y Haase (2015), Säumel et al. (2016), como se citan en Lyytimäki, (2017).

2.7. COSTOS DE MANTENIMIENTO

Con una adecuada planificación, diseño y manejo, los árboles urbanos pueden ofrecer una amplia gama de beneficios importantes para la sociedad (Vogt et al., 2015). El cuidado adecuado de cada uno de los árboles es beneficioso tanto para el bosque urbano como, de manera indirecta, para las poblaciones urbanas en general. Si los árboles no reciben la atención necesaria, se generan costos indirectos y perjuicios que incluyen la caída de árboles, un mayor riesgo de plagas, interferencias causadas por ramas y raíces, y muchos otros problemas.

Para evitar conflictos con otras infraestructuras urbanas, es necesario intervenir y mantener los árboles de manera apropiada. Además, un enfoque proactivo y sistemático en el mantenimiento de los árboles también conduce a una gestión más eficiente en comparación con un enfoque reactivo o crítico (Benito & Palermo Arce, 2022).

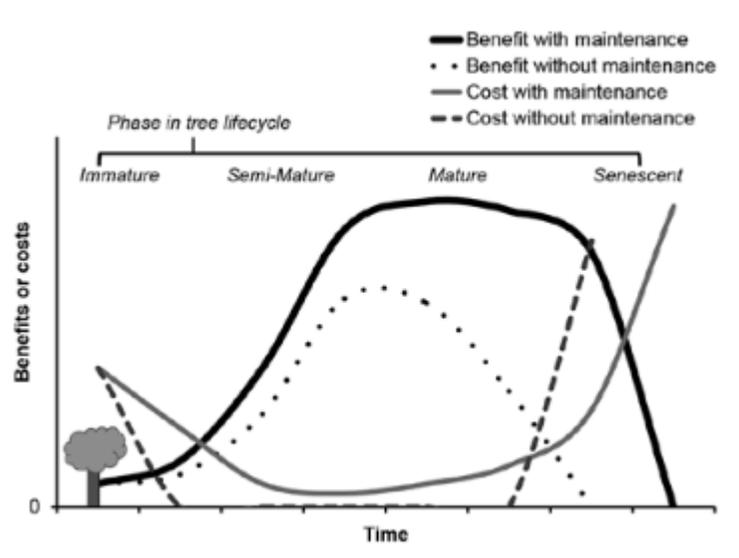
Investigadores y profesionales de los bosques urbanos pueden valorar los beneficios de los árboles utilizando softwares apropiados, tanto de valoración directa como indirecta, como por ejemplo valores paisajísticos, costos de reposición, encuestas de disposición a pagar, cambios en la tasación de propiedades etc. El valor de estos beneficios se utiliza con frecuencia para justificar inversiones en árboles (McPherson et al., 2005).

Idealmente, un análisis económico del árbol urbano, o sea los beneficios valorizados menos los costos de plantación y mantenimiento, es usado para crear modelos de beneficio neto, a través del análisis de “costo – beneficio”. Los beneficios netos ocurren cuando los beneficios exceden los costos incurridos en la obtención de estos. De esta forma, los costos del mantenimiento y de la gestión de los árboles urbanos se perciben menores. En la Figura 5 se observan curvas de costo y beneficio de un árbol de la calle, con (líneas continuas) y sin (líneas

discontinuas) un mantenimiento adecuado. Los beneficios se maximizan durante la fase de madurez de un árbol y disminuyen rápidamente a través de la senescencia, mientras que los costos muestran un patrón inverso (Vogt et al., 2015).

Figura 5

Costos y beneficios hipotéticos durante la vida útil de un árbol



Nota. Tomado de Vogt et al. (2015).

Es primordial preservar la salud, longevidad y productividad del arbolado urbano para garantizar beneficios sostenibles a largo plazo. Esto requiere una planificación cuidadosa en la selección e implementación de especies diversas, así como un programa sólido de mantenimiento y cuidado de los árboles.

La adecuada elección de especies y la implementación de estrategias como ampliar alcorques y diseñar aceras serpenteantes pueden mejorar la longevidad de los individuos, reduciendo los costos de reparación y mantenimiento a largo plazo (McPherson et al., 2005)

Asimismo, la poda debe realizarse con objetivos claros y de manera preventiva, evitando prácticas inadecuadas que puedan comprometer la integridad de los individuos. Un programa estructurado de poda, enfocado en eliminar ramas muertas y posibles interferencias, garantiza la seguridad urbana y promueve la salud a largo plazo de los árboles (Clark & Matheny, 2010; Escalante & Colunga, 2003; Terrani Texeira, 2014).

Uno de los costos poco estudiado de no mantener apropiadamente a los árboles está relacionado con la gestión de riesgos y responsabilidades. Si el resultado es un árbol que falla y causa daños a personas o bienes, puede ser otorgada una indemnización a la parte perjudicada, a cargo del responsable del árbol. La inspección sistemática de los árboles en busca de riesgos de caída y/o interferencias y la documentación de las inspecciones pueden ayudar a minimizar

el potencial de demandas por responsabilidad civil, tal como indican Anderson y Eaton (1986), Sharon (1987), Sreetheran et al. (2011, como se citan en Vogt et al., 2015).

Un trágico ejemplo de la importancia del mantenimiento y control adecuado de los árboles urbanos es el caso en el que el Tribunal condenó a la Intendencia Municipal de Montevideo (IMM) por daños morales y materiales tras la caída de un árbol sobre un vehículo, lo que resultó en la muerte de una persona y lesiones a su hijo (Sentencia No. 296, 2015).

El tribunal determinó que la IMM fue responsable por la falta de cuidado, control y conservación del árbol caído. Se concluyó que la caída no fue un evento imprevisible, sino que pudo haberse evitado con medidas preventivas adecuadas. Aunque el árbol no mostraba signos visibles de deterioro, el tribunal destacó que solo se realizó una inspección ocular, omitiendo el uso de tecnologías avanzadas que podrían haber detectado problemas internos. Este caso subraya la necesidad crítica de una gestión adecuada y proactiva de los árboles urbanos para prevenir tragedias similares (Sentencia No. 296, 2015).

2.8. RIESGO DEL ARBOLADO

El riesgo se define como una contingencia o proximidad de un daño (Real Academia Española, s.f.a), mientras que peligro es un riesgo o contingencia inminente que suceda algún mal (Real Academia Española, s.f.b). El riesgo es la combinación de la probabilidad de que suceda un evento y la severidad de las potenciales consecuencias. Por otro lado, un peligro es la fuente probable de un daño. En relación a los árboles, un peligro son las partes del mismo identificadas como fuente probable de un daño. Cualquier parte del árbol, tronco, ramas o copa puede fallar estructuralmente, colapsar y caer sobre una persona o propiedad, causando lesiones o daños.

La falla de un árbol puede ser dada a partir de la pérdida de soporte mecánico en el sistema raíz-suelo, en este caso del árbol entero, o por la rotura de una de sus partes; el ambiente de la ciudad favorece el potencial de falla más que el medio natural, dada la menor capacidad de respuesta del árbol (Calaza Martínez & Iglesias Díaz, 2016).

Para Calaza Martínez e Iglesias Díaz (2016) todo árbol presenta o tiene riesgo, no existe el riesgo cero, es decir, que el riesgo se puede manejar para mantenerlo en un nivel bajo, ya que para eliminarlo completamente habría que eliminar cada árbol. Dicho manejo debe resultar en un rango de riesgo aceptado por los jueces, las compañías aseguradoras y la sociedad en general, ya que no es viable garantizar la seguridad total o riesgo nulo.

Para evaluar el riesgo de los árboles, es necesario combinar atributos relacionados a la probabilidad de falla del individuo, cuáles son los posibles

afectados, llamados dianas, y la consecuencia o daño potencial (Dunster et al., 2017). Uno de los atributos importantes para la probabilidad de falla es la especie, ya que se relaciona linealmente con las propiedades de resistencia de la madera (Mattheck & Breloer, 1994). Otro atributo para este componente son los relacionados a los factores ambientales, que pueden afectar tanto la salud como la estructura de los árboles, como son las heladas, vientos fuertes y granizo. Estos inciden en los árboles provocando heridas, fracturas, grietas, e incluso la muerte (Comerci, 2010).

Desconocer lo que sucede debajo de la superficie es un gran problema, debido a que en innumerables ocasiones los árboles no muestran daños visibles en su parte aérea y sólo se detecta el daño cuando es irreparable (Day et al., 2010).

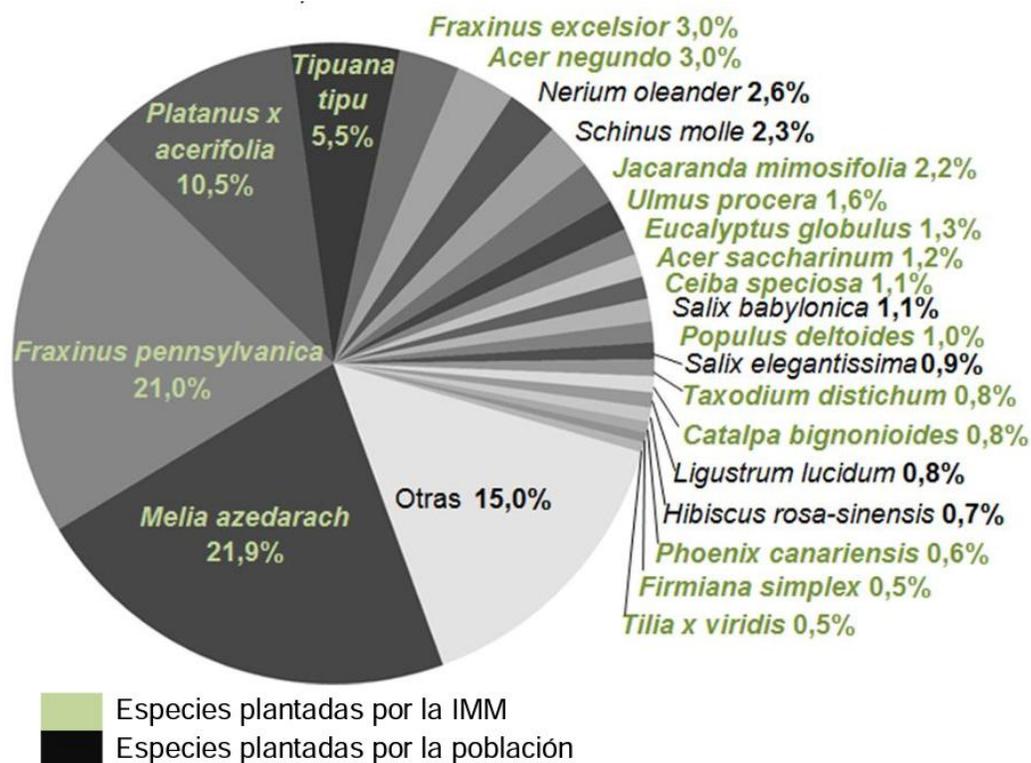
Comprender cómo los árboles responden a las condiciones climáticas locales es un aspecto fundamental para evaluar el riesgo y gestionar adecuadamente el arbolado. Esto implica generar un perfil de falla por especie, lo cual proporciona información valiosa. Además, se puede considerar el estudio de especies más resistentes a tormentas y con menor frecuencia de falla como opción de gestión de planes de arbolado urbano.

2.9. ESPECIES FRECUENTES

Según el inventario departamental de 2005-2008 (Áreas Verdes & Espacios Públicos y Edificaciones, 2008), en la ciudad de Montevideo se registraron 211.402 árboles en sus aceras. Además, se estima que hay alrededor de 100.000 árboles adicionales en parques y plazas. Esta cantidad resalta la riqueza arbórea de Montevideo, con aproximadamente un árbol por cada cuatro habitantes, una proporción destacable en comparación con otras capitales de América Latina. Las especies más frecuentes en la ciudad están indicadas en la Figura 6 con su proporción relativa.

Figura 6

Proporción de especies cultivadas en las aceras de Montevideo



Nota. Extraído de Terrani Texeira (2014).

2.9.1. Breve descripción de las principales especies

Melia azedarach L., "Paraíso", Familia: Meliaceae, puede alcanzar hasta 15 m de altura, de follaje caduco. Flores pequeñas y perfumadas, frutos drupas de 2 cm de diámetro. Estos frutos al caer resultan molestos sobre las veredas y causan un olor desagradable. Se multiplica fácilmente por semilla. Es originario del Himalaya. En la región su crecimiento es muy rápido, pudiendo llegar hasta 2 m de alto por año. Es longevo, pudiendo llegar a los 100 años (Alvarado et al., 2012).

Esta especie es afectada por dos tipos de fitoplasmas, que causan pérdida precoz del follaje, envejecimiento y muerte prematura (Grau & Kortsarz, 2012; Jolochin & Speroni, 2007; Valla et al., 1999, como se citan en Terrani Texeira, 2014).

En general no causa problemas en las veredas. Rebrotta de cepas (Grau & Kortsarz, 2012; Valla et al., 1999). Es muy rústico y bastante resistente, soporta bien el calor intenso y bajas temperaturas de hasta -10 °C, aunque hay que colocarlo algo resguardado del viento fuerte, ya que sus ramas son frágiles y pueden partirse con facilidad (Mula, s.f.).

No tiene buena respuesta a la poda severa en arboles adultos (Alvarado et al., 2012).

Fraxinus pennsylvanica Marshall, “Fresno americano”, Familia: Oleaceae. Árbol de 8 a 15 m de altura, de copa redondeada u oval. Follaje caduco, hojas de un intenso color amarillo antes de caer. Los frutos son sámaras de 3 a 5 cm de largo dispuestas en racimos. Originario del centro y este de EE. UU., desde el Golfo de México hasta Canadá. Es de fácil propagación por semillas. Es de rápido crecimiento. Sus raíces pueden afectar las veredas si el alcorque es muy pequeño (Grau & Kortsarz, 2012; Valla et al., 1999)

Puede tolerar poda intensa cuando joven, debido que presenta suficientes yemas latentes en madera, y a su capacidad para compartimentar la descomposición (Harris et al., 2003)

Se ha convertido en una de las especies más usadas en el arbolado de veredas debido a su adaptabilidad, rusticidad y rápido crecimiento. Estas características más la gran producción de semillas viables y su facilidad de germinación hace que sea alarmante la presencia de estos árboles exóticos en el bosque indígena (Marchesi et al., 2013).

Fraxinus excelsior L., “Fresno europeo”, Familia: Oleaceae. Árbol de unos 8 a 20 m de altura, de follaje caduco y copa subglobosa. Produce buena sombra, sus frutos son sámaras. Especie originaria de Europa, Asia Menor y norte de Irán (Valla et al., 1999).

Posee una raíz principal profunda y pequeñas raíces laterales, por lo que es muy apropiado para veredas (Valla et al., 1999). Es de fácil trasplante. Es muy sensible a los ataques fúngicos y entomológicos, especialmente cuando está expuesto a vientos.

Posee una regeneración natural abundante por lo que se hace invasora (Loewe Muñoz et al., 1997).

Platanus x acerifolia (Aiton) Willd, “Plátano”, Familia: Platanaceae. Es una especie híbrida entre *Platanus occidentalis* (originario de A. del norte) y *Platanus orientalis* (originario de Asia). Alcanza alturas de entre 15 y 25 m, de follaje caduco. Sus brotes jóvenes y frutos desprenden pelos pequeños que pueden causar alergias. Se ha utilizado en muchas ciudades del mundo, ya que es un árbol de rápido crecimiento, de fácil trasplante, tolerante a la contaminación atmosférica y a la compactación del suelo. La calidad de su madera y su sanidad lo convierten en un árbol muy seguro. Además, soporta podas intensas (Grau & Kortsarz, 2012; Valla et al., 1999). Necesita espacio para su desarrollo, por lo que se recomienda su uso en veredas anchas de más de 3m (Benito & Palermo Arce, 2022). Requiere buena luz, es resistente a los insectos, pero sensible al ataque de hongos (*Phytophthora*)

Naturalmente adaptadas a las zonas pantanosas que lo hace resistente a las limitaciones en la tensión de oxígeno del suelo (Benito & Palermo Arce, 2022).

Es de las primeras especies plantadas en la ciudad. Es la principal especie con DAP superior a 60 cm, y el 86% de sus individuos superan los 40 cm. Denota una resistencia natural al ambiente urbano. Se realizan solo reposiciones en calles emblemáticas por lo que la población ha ido envejeciendo. Dado que la fructificación resulta molesta, la reposición se ha hecho con *Platanus occidentalis* por tener un comportamiento parecido pero su menor fructificación (Terrani Texeira, 2014).

Tipuana tipu (Benth.) Kuntze, “Tipa”, Familia: Fabaceae Es un árbol de copa muy amplia y ramificada, alcanza alturas de entre 15 y 30 m. El follaje es tardíamente caedizo. Las flores aparecen desde octubre a diciembre y caen rápidamente. Es originaria del norte de Argentina, Bolivia y Brasil. Se propaga por semillas fácilmente (Grau & Kortsarz, 2012).

Tolera podas moderadas, podas muy intensas dan lugar a la formación de ramas grandes sin resistencia mecánica en la unión con el eje principal. Durante la primavera se ve atacada por un insecto picosuctor que succiona savia y excreta un líquido azucarado que cae y causa molestias. Cuando el árbol alcanza gran tamaño sus raíces pueden ocasionar problemas en veredas y las tormentas pueden afectar la copa (Grau & Kortsarz, 2012; Lombardo, 1979)

Es un árbol robusto, adaptable al entorno urbano. Es recomendada en avenidas y parques, pero no en calles estrechas ya que puede adquirir un excesivo tamaño y sombrear demasiado en invierno por su follaje de caducidad tardía (Valla et al., 1999)

Acer negundo L., “Arce negundo”, Familia: Sapindaceae. Árbol de entre 7 y 12 m de alto, de copa globosa y amplia. Tronco y ramas generalmente rectas. Follaje caduco, frutos compuestos por dos sámaras soldadas. Es originario del centro y sudeste de EEUU (Alvarado et al., 2012).

En general es de rápido crecimiento. Tolera las sequías, compactación del suelo y resiste al ambiente urbano, pero suele sufrir envejecimiento precoz, por lo que se ha dejado de usar en muchas ciudades. Las heridas de podas cicatrizan mal y la estructura del árbol puede quedar comprometida. Las raíces suelen ser agresivas (Grau & Kortsarz, 2012; Valla et al., 1999). Posee madera blanda que favorece el quiebre y caída de ramas (Benito & Palermo Arce, 2022). Es atacado por hongos que ahuecan su tronco, muriendo las ramas paulatinamente.

Jacaranda mimosifolia D. Don, “Jacarandá”, Familia: Bignoniaceae. Árbol de crecimiento medio con fuste recto, que alcanza entre 10 y 20 m. Copa subglobosa o aparasolada, follaje tardíamente caduco. Abundantes flores grandes azul-violáceas, que se presentan dos veces al año, primavera y principio de otoño, pero con menos intensidad, característica muy apreciada como ornamental. Originario del Noroeste Argentino, Bolivia y Brasil. Los individuos adultos toleran las

heladas moderadas y la contaminación. Se propaga por semillas que germinan con facilidad (Alvarado et al., 2012).

Es tolerante a la poda. Sus raíces pueden ser atacadas por hongos que debilitan al árbol y lo vuelven vulnerable frente a tormentas (Grau & Kortsarz, 2012).

Requiere mantenimiento regular para extraer ramas muertas o mal ubicadas.

Ulmus procera Salisb., “Olmo europeo”, Familia: Ulmaceae. Árbol de entre 15 y 20 m de altura, de follaje caduco, copa amplia y algo ovalada. Tronco recto con ramas laterales fuertes y extendidas, ascendentes cuando jóvenes. Frutos sámaras. Es originario de Europa y Asia y se cultiva como ornamental y forestal en todo el mundo (Grau & Kortsarz, 2012; Valla et al., 1999).

Se multiplica por semillas, las cuales pierden rápidamente su poder germinativo. Actualmente no tan cultivado ya que se prefieren especies de más rápido crecimiento (Grau & Kortsarz, 2012; Valla et al., 1999).

Sufre la enfermedad holandesa del olmo y frecuentemente es atacado por insectos minadores (Moniz, 1979). Estas enfermedades pueden causar daños graves, afectando la estética y la salud del árbol, lo que puede requerir intervenciones de poda sanitaria y otros tratamientos fitosanitarios (Bustos, 2010).

Schinus molle L. “Anacahuita, falso pimentero, gualeguay, molle o aguaribay”. Es una especie de follaje persistente, de hasta 25 metros de altura. Posee una copa amplia, densamente globosa, de tronco sinuoso con una corteza rugosa, gris oscura, y puede llegar a 1,5 metros de diámetro. Sus hojas son compuestas y alternas. Su fruto es una drupa globosa, de color rosado a rojiza, brillante. Especie propia de buena parte de América del Sur (Alvarado et al., 2012).

Es una especie longeva, intolerante a la sombra, de rápido crecimiento, resistente a las sequías, pero no a las heladas. Está adaptada a crecer en suelos con diferentes propiedades, aunque prefiere habitar cercano a cursos de agua, suelos profundos y arenosos. Posee bajos requerimientos hídricos. Además, destaca su resistencia a ambientes contaminados. Adecuada tolerancia a las podas (García & Ormazabal, 2008).

Es un árbol de alto valor ornamental (calidad estética) por su tamaño, rusticidad y vistosos frutos colgantes, que brinda gran belleza escénica. Estas características ornamentales, medicinales, su rápido crecimiento, buena sombra, adaptabilidad y fácil propagación por semillas hacen que sea muy elegido y plantado en las aceras por la comunidad (Alvarado et al., 2012; Terrani Texeira, 2014).

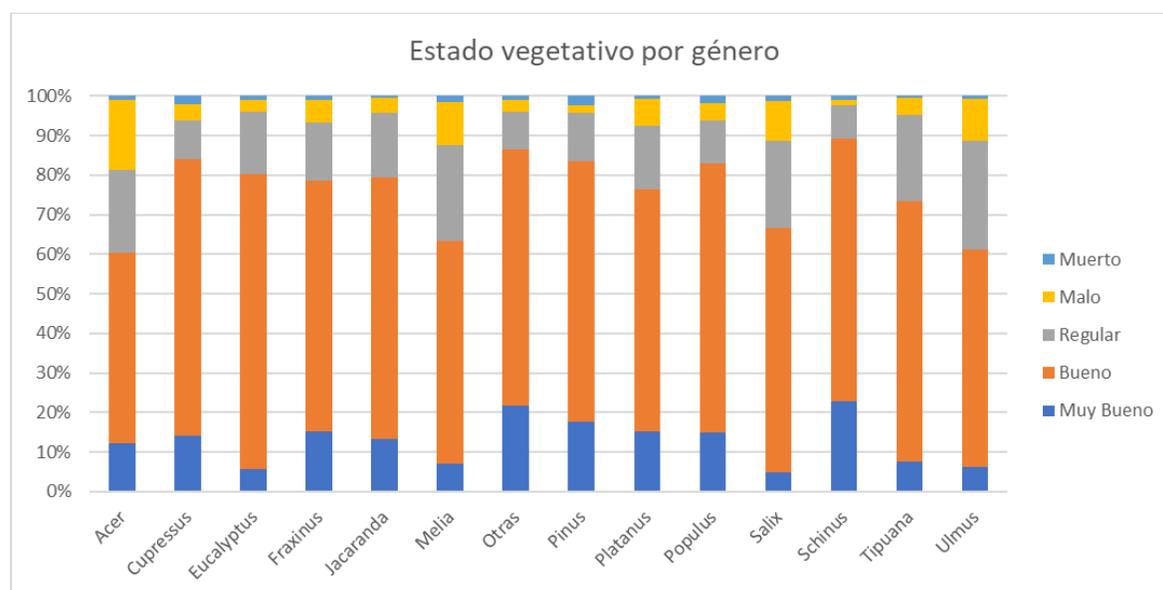
Sus características, de ramificarse a baja altura, ser de follaje persistente y la tendencia a levantar las veredas, la hace no recomendable para su ubicación en

aceras, por lo que la Intendencia no promueve su plantación (Alvarado et al., 2012; Bozzo, 2021; Colán de la Vega et al., 2019).

2.9.2. Estado vegetativo

El Censo 2008 proporciona información sobre la calidad del arbolado, clasificados por especie (Áreas Verdes & Espacios Públicos y Edificaciones, 2008). En la Figura 7 se presenta un gráfico que muestra el estado vegetativo de los árboles evaluados visualmente, organizados por género y distribuidos en cinco categorías. Las cepas, tocones o árboles secos se clasificaron como muertos. Los resultados se expresan en porcentaje para facilitar la comparación entre los diferentes grupos.

Figura 7
Estado vegetativo por género, familia o grupo



Nota. Elaborado con base en los datos del censo 2008 (Áreas Verdes & Espacios Públicos y Edificaciones, 2008).

Se puede resaltar la proporción de individuos en mal estado vegetativo en *Acer* 17,8%, *Melia* 10,9%, *Ulmus* 10,6% y *Salix* 9,9%, mientras que *Cupressus*, *Pinus*, *Schinus* y *Eucalyptus* fueron evaluados muy positivamente.

Las palmeras (Arecáceas) en 2005, fueron evaluadas como buenas 61% y muy buenas 36%. En el 2022 se ha registrado un fuerte ataque del picudo rojo (*Rynchophorus ferrugineus*) con gran mortandad de palmeras *Phoenix canariensis* en zona sur y en particular en Montevideo (Dirección General de Servicios Agrícolas, 2024). Esta especie representa la mitad de la población de palmeras en aceras.

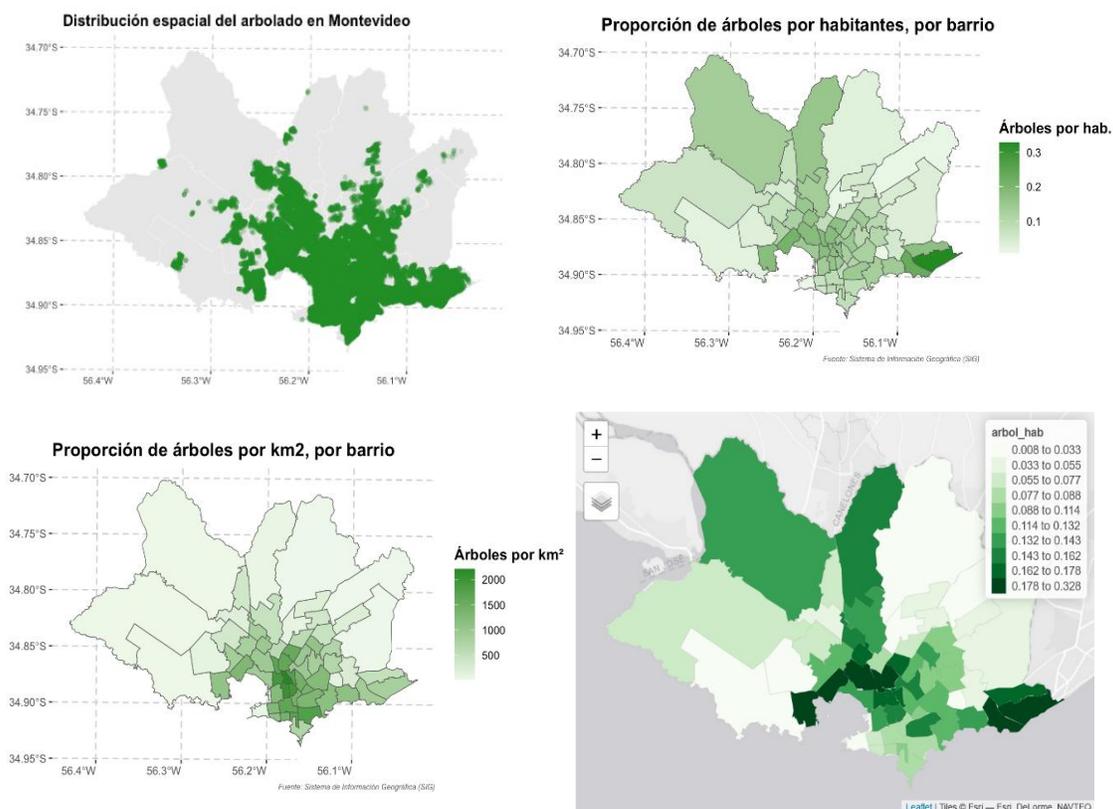
3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDIO Y PERÍODO

El presente trabajo se realizó sobre información recopilada en la ciudad de Montevideo. Es la capital de la República Oriental del Uruguay y del departamento homónimo. Se localiza en la zona sur del país, ocupa un área de 530 km² y cuenta con costas sobre el Río de la Plata, donde se encuentran la bahía de Montevideo y el principal puerto de la región. El Anuario Estadístico Nacional 2023 estimó 1.383.965 habitantes en el departamento (Instituto Nacional de Estadística [INE], 2023). Ha sido calificada como la ciudad con mejor calidad de vida de América Latina (Uruguay XXI, 2023).

Se destaca como ciudad arbolada con aproximadamente 300.000 ejemplares de árboles en plazas, parques y calles, lo que significa que existe aproximadamente un árbol cada cuatro habitantes, siendo dos tercios arbolado alineado en aceras (Recagno, 2024).

Figura 8
Distribución de árboles y habitantes



Nota. Tomado de Recagno (2024).

Se evaluaron 4353 denuncias de particulares hechas a la Intendencia de Montevideo por la caída de árboles y ramas en la vía pública en el período comprendido entre el 25 de enero de 2012 y el 9 de marzo de 2017 proporcionadas por el Sector Arbolado del Servicio de Áreas Verdes de la IM al Departamento Forestal de Facultad de Agronomía (comunicación personal, 27 de marzo, 2020). No se incluyeron denuncias por eventos ocurridos en plazas, parques o jardines, ya sean públicos o privados.

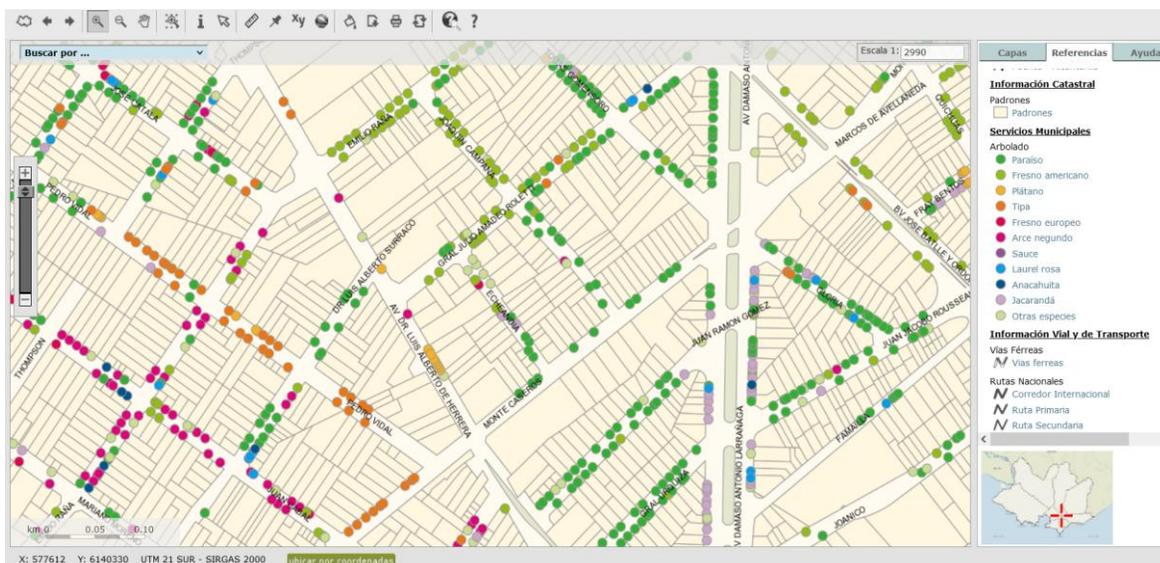
3.2. PROCESAMIENTO DE LAS DENUNCIAS

La Intendencia de Montevideo (IM) registra estas denuncias y coordina las acciones necesarias a través de contratistas. Los datos recopilados incluyen la fecha de la denuncia, la dirección y Centros Comunales Zonales (CCZ¹), observaciones sobre el nivel de urgencia, el tamaño del árbol, etc. El contratista seleccionado para intervenir en el incidente proporciona información adicional relativa al trabajo realizado (poda, extracción total, reparación de vereda etc.). La resolución rápida de estos incidentes es esencial para evitar nuevas situaciones de riesgo, como cortes de calles, ramas sobre cables eléctricos o árboles inclinados con riesgo de caída.

Se depuraron los registros eliminando denuncias duplicadas, ya sea por la presentación por varios vecinos o reiteradas por demoras en la acción municipal. Algunas de las denuncias que carecían de la información de especie o género pudieron ser completadas por inferencia mediante el inventario de arbolado urbano de 1998 usando la dirección de la denuncia. Este inventario está disponible en el Sistema de información geográfica (SIG) (Intendencia de Montevideo, 2020) en la capa “Servicios IdeMontevideo”, apartado “Arbolado sin actualizar (2001)”. A modo de ejemplo se puede apreciar una captura de pantalla de la referida web en la Figura 9, donde se puede apreciar la ubicación de cada ejemplar y el género o especie, o agrupamiento de especies (otras especies). También se ofrecen herramientas de búsqueda por dirección, cruce de calles, padrón etc.

¹ CCZ: dependencia municipal que se encarga de la gestión administrativa, trámites, denuncias, solicitudes y servicios, y descentralizadas de la Intendencia de Montevideo.

Figura 9
Sistema de información geográfica



Nota. Tomado de Intendencia de Montevideo (2020).

Se realizó una consolidación de las bases de datos del censo 2008 (Áreas Verdes & Espacios Públicos y Edificaciones, 2008) que están presentadas por CCZ, obteniendo una tabla completa de los árboles censados. Si bien la web aclara que los datos no están actualizados, son una base fundamental para este trabajo. Cada árbol tiene una línea de registro donde se le asigna un número identificatorio y se determina su ubicación por dirección, número de puerta e intersección, especie, dimensiones del ejemplar, dimensiones de acera, estado vegetativo e interferencia con servicios aéreos o subterráneos.

También se usó la herramienta Google Street View (Google, s.f.b) que proporciona panorámicas a nivel de calle (360 grados de movimiento horizontal y 290 grados de movimiento vertical) y permite ver partes de la ciudad con fecha de agosto de 2015. Para la determinación de especie o género se basó en forma del árbol, follaje y tipo de corteza que aparece en las imágenes correspondientes a la dirección de la denuncia. Además, se utilizaron imágenes satelitales históricas proporcionadas por Google Earth (Google, s.f.a) para determinar la presencia del árbol antes de la fecha de la denuncia y su ausencia posterior a la misma.

Para clasificar las denuncias evaluadas en este estudio, se aplicó un criterio de agrupación basado en la cantidad de individuos más frecuentemente identificados. Los casos menos comunes se agrupan bajo la categoría de "Otros", que abarca un total de 193 géneros y aproximadamente 320 especies reconocidas.

Sin embargo, diversas causas impidieron la determinación precisa de la especie o género de los árboles caídos. Entre las dificultades más destacadas se incluyen: la falta de la dirección exacta en el Sistema de Información Geográfica

(SIG) municipal, el registro de direcciones que solo corresponde a las puertas de los denunciados y no a los árboles caídos, la falta de correspondencia entre el inventario de árboles y las fotos del lugar, la presencia de múltiples especies en áreas muy pequeñas, la falta de actualización del inventario mapeado en algunas calles, y la falta de fotos a nivel de calle, ya que algunos asentamientos fueron creados después de la recopilación de imágenes de Google Street en agosto de 2015. Por lo tanto, estos 890 casos, un 30,4%, se registraron como "Sin dato".

En los listados de denuncias organizados por evento climatológico adverso, se tomó la fecha del evento y no de la denuncia, ya que así lo registra la Intendencia.

El índice "tasa de caída" es una métrica diseñada para analizar y comparar la incidencia proporcional de denuncias de caídas de árboles en relación con el inventario total de árboles. Se calcula dividiendo el número de denuncias de caídas, agrupadas por género o familia de árboles, entre el inventario total de árboles en la misma categoría. Este resultado permite evaluar la proporción de denuncias de caídas entre los diferentes grupos de árboles.

Este índice es particularmente útil para cuantificar y entender la incidencia de caídas de árboles en relación con la composición del arbolado. Proporciona información sobre qué árboles pueden ser más propensos a fallar y ayuda a orientar las estrategias de gestión.

Se llevó a cabo una búsqueda en la web para encontrar noticias sobre cada temporal, su desarrollo, los casos de caída de árboles y los daños materiales, así como imágenes relacionadas con estos eventos. Esta búsqueda reveló varios incidentes significativos que ilustran los efectos del temporal para comprender la magnitud y el alcance del evento. Estos informes pueden ofrecer detalles sobre las áreas afectadas y los daños sufridos por las estructuras.

Es importante tener en cuenta que las noticias y artículos obtenidos a través de la búsqueda en la web pueden variar en calidad, veracidad y representatividad.

3.3. DATOS METEOROLÓGICOS

Los datos meteorológicos utilizados en este estudio fueron obtenidos de la Dirección de Climatología y Documentación del Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET) (L. Chipponelli, comunicación personal, 22 de febrero, 2019). La estación meteorológica más cercana al área de estudio fue la de Prado, la cual registró los datos de viento entre las 7:00 y las 19:00 horas durante el periodo considerado. Debido a esta limitación, se recurrió a los datos proporcionados por la estación meteorológica del Aeropuerto de Carrasco para describir los sucesos meteorológicos relacionados con los temporales. Esta estación meteorológica se encuentra en Canelones, al oeste del departamento de Montevideo.

Las mediciones de viento de las estaciones de INUMET fueron realizadas a una altura de 10 metros. Cada hora se registró la intensidad promedio del viento y

la dirección. Además, se tuvo en cuenta la presencia de ráfagas, que se definen como incrementos breves y repentinos en la intensidad del viento.

Se utilizó información sobre la precipitación de la estación meteorológica de Prado, analizando los registros de acumulados diarios.

Se seleccionaron los 7 temporales más relevantes en términos de la cantidad de árboles caídos, los cuales serán objeto de un estudio detallado. Para cada temporal, se presentan gráficos de variables meteorológicas que permiten comprender su evolución en el tiempo. Estos gráficos muestran la pluviometría diaria, la velocidad media del viento, la velocidad de las rachas y la dirección del viento en cada hora. Además, se presentan los antecedentes y el desarrollo del temporal, así como un gráfico detallando el evento, un mapa de las denuncias agrupadas por CCZ y publicaciones web referidas al evento.

Para el temporal del 3 de enero de 2017, se obtuvieron datos de intensidad del viento tomados en la Terminal Cuenca del Plata, ubicada en el puerto de Montevideo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el período comprendido entre el 25 de enero de 2012 y el 9 de marzo de 2017, se registraron un total de 4353 denuncias relacionadas con árboles y ramas. De estas, 2.698 denuncias correspondieron a árboles caídos o en riesgo de caer, mientras que 1.805 se refirieron a ramas caídas o colgadas.

Es destacable la cantidad de intervenciones que los municipios debieron atender en un breve período, ya que muchas de estas situaciones presentaron peligros inminentes que requirieron atención urgente, como por ejemplo árboles descalzados o fracturados, o ramas suspendidas y desprendidas con riesgo inminente de caída. Cada árbol caído generó distorsiones en los servicios, como interrupciones en el cableado, rotura de caños, daños en veredas y cortes en el tránsito, lo que representó una amenaza para la seguridad pública en esos momentos.

Además, otras entidades públicas, como UTE, ANTEL y los cuerpos de Policía y Bomberos, también intervinieron para atender a los damnificados y restablecer los servicios afectados. Sin embargo, estas intervenciones no suelen estar registradas de manera detallada en estos archivos municipales, lo que limita una comprensión más completa del impacto y la respuesta ante estas incidencias. La coordinación y registros las realiza el Centro Coordinador de Emergencias Departamentales (CECOED) Montevideo quien deriva los servicios requeridos a los organismos correspondientes.

En este contexto, es importante mencionar que la decisión de no profundizar en el estudio de las denuncias por la caída de ramas se fundamenta en que estas situaciones pueden ser gestionadas por los propios vecinos, lo que puede llevar a una subdeclaración y, por ende, a un análisis menos fiable.

Por otro lado, la caída de un árbol representa un evento más complejo que requiere la intervención de profesionales capacitados y el uso de herramientas adecuadas. Por esta razón, las denuncias relacionadas con la caída de árboles son consideradas más fiables para realizar estimaciones y análisis.

Todos los incidentes se registran en el Sistema Único de Respuesta, que lo pasa a la Guardia de Arbolado que inspecciona y dispone el plan de acción. El Sistema de Emergencias de Arbolado, es parte del Sistema de Actuaciones por Emergencia de la IM, a través del CECOED. La Guardia Permanente de Arbolado, atiende las 24 h. Los Servicios de Emergencia incluyen la intervención el retiro de la parte del árbol que esta caída, quebrada o rajada y la instalación de balizas cuando es necesario

Se registraron las siguientes denuncias asociadas a temporales, detalladas en la Tabla 3.

Tabla 3*Denuncias de caída de árboles y ramas, agrupadas por evento*

Fecha	Denuncias de árboles caídos	Denuncias de ramas caídas
25/01/2012	1	
01/02/2012	5	4
06/03/2012	24	22
18/09/2012	1.050	269
22/10/2012	268	139
24/01/2013	59	162
02/02/2013	73	76
02/03/2013	26	57
15/09/2013	20	15
25/08/2014	60	24
04/10/2014	6	14
01/11/2014	15	24
26/12/2014	17	32
31/12/2014	29	16
13/11/2015	11	25
14/12/2015	186	87
21/12/2015	16	45
26/07/2016	19	8
13/09/2016	209	68
19/10/2016	46	52
27/10/2016	206	142
01/11/2016	21	38
03/01/2017	279	409
09/03/2017	52	77
05/02/2017	233	561
Total general	2.931	2.366

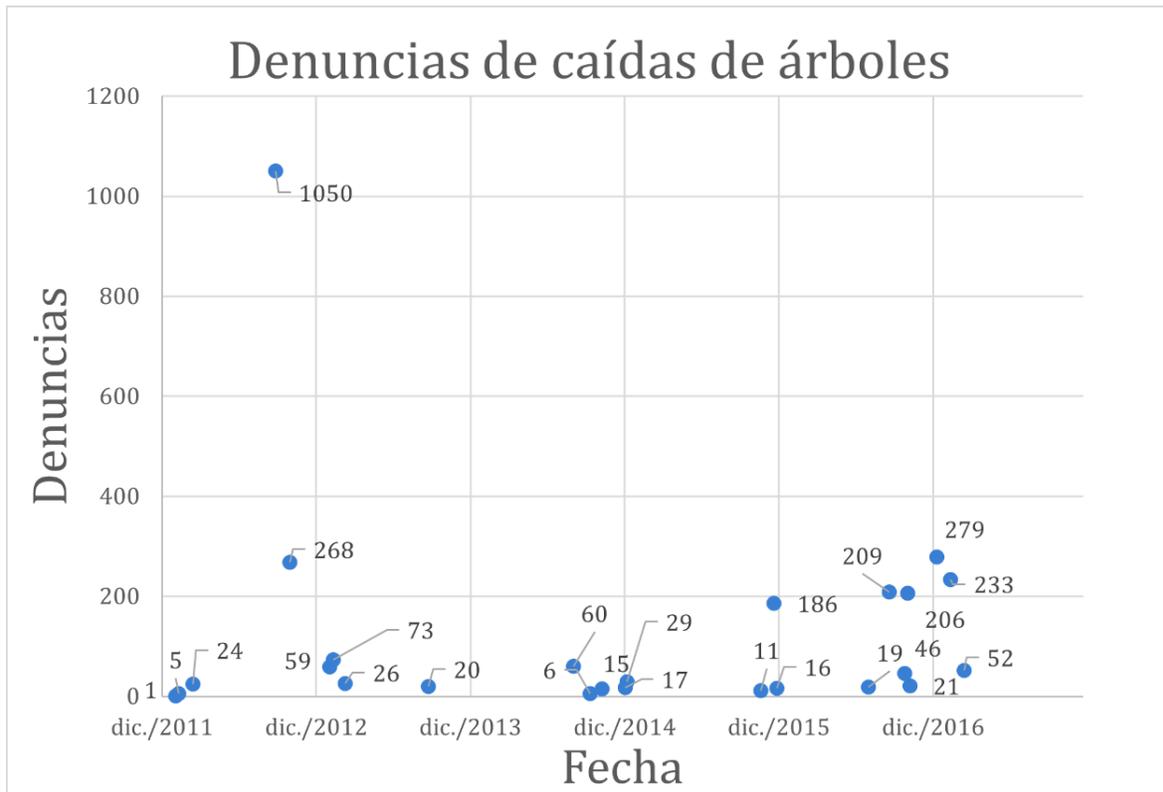
En cuanto a denuncias de ramas caídas, destaca la tormenta del 5 de febrero de 2017 (561 denuncias) seguida de la del 3 de enero de 2017 (409 denuncias).

El mayor número de caída de árboles se registró el 19 de septiembre de 2012, con 1.051 denuncias. Este temporal ocurrió al final del invierno, y estuvo caracterizado por rachas de viento de más de 100 km/h y precipitaciones acumuladas superiores a 100 mm.

Otros temporales, con un número significativo de denuncias, fueron el 3 de enero de 2017 con 279 árboles caídos, 22 de octubre de 2012, con 268, 14 de diciembre de 2015 con 186, el 13 de septiembre de 2016 con 209, el 27 de octubre de 2016 con 206, y el 5 de febrero de 2017 con 233.

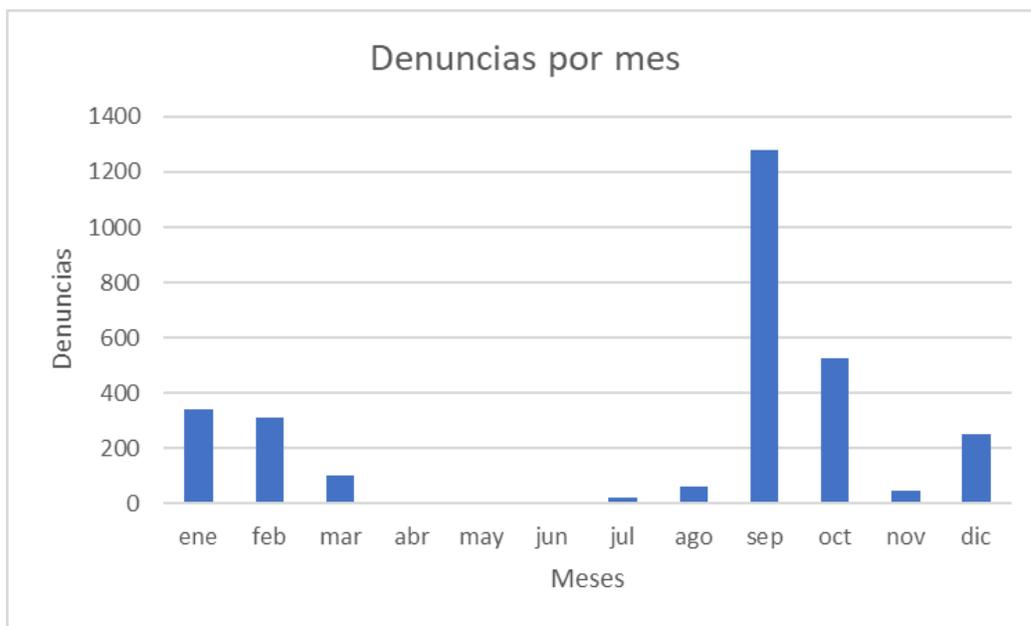
La Figura 10 presenta una gráfica de las denuncias registradas durante el período mencionadas en la Tabla 3, se destaca la importancia del temporal ocurrido el 18 y 19 de septiembre de 2012 y su influencia en los análisis.

Figura 10
Denuncias de caída de árboles



Puede apreciarse que todos los años ocurrieron caídas de árboles variando la intensidad. El 2012 fue excepcional con 1.348, 2017 con 564, 2016 con 501 denuncias. Septiembre es el mes más significativo en caída de árboles, seguido por octubre, enero y diciembre. En contraste, no se reportan caídas en abril, mayo o junio, lo que indica una clara estacionalidad de estos eventos (Figura 11). Esto es concordante con las observaciones hechas por Durañona (2015) en su estudio de vientos extremos en Uruguay.

Figura 11
Denuncias agrupadas por mes



En la Tabla 4 se presentan las denuncias agrupadas por Municipio². Se puede observar que el Municipio D es el menos arbolado y presenta la mayor tasa de caída, mientras que el Municipio E es el más arbolado y tiene la menor tasa de caída. Por otro lado, el Municipio C registró la mayor cantidad de denuncias, mientras que el Municipio B reportó la menor cantidad.

Tabla 4
Denuncias por Municipio

Municipio	Denuncias	Inventario	Tasa de caída
A	476	33.232	1,43%
B	197	16.380	1,20%
C	494	32.305	1,53%
CH	441	25.883	1,70%
D	290	16.038	1,81%
E	449	42.950	1,05%
F	249	18.544	1,34%
G	335	26.146	1,28%
Total general	2.931	211.478	1,39%

² Municipio: circunscripción territorial que constituye el tercer nivel de gobierno en Uruguay. En Montevideo son ocho municipios, denominados de la A a la G, y cada municipio está presidido por un alcalde, electo por los ciudadanos del municipio.

A continuación, se presenta la Tabla 5 con un resumen de los municipios D y E, elaborada a partir de datos extraídos de Terrani Texeira (2014) que realizó una evaluación de la estructura y comportamientos del arbolado de Montevideo.

Tabla 5
Arbolado de Montevideo por Municipio (2005-2008)

Municipio	Especies Principales	Estructura de Tamaño-Edad	Estado Vegetativo	Relación Árbol/Habitante
D	<i>Fraxinus pennsylvanica</i> , <i>Melia azedarach</i> , <i>Platanus x acerifolia</i>	Mayor proporción de árboles jóvenes, con más del 50% de los individuos con DAP < 40 cm.	Mejor estado de los árboles en comparación con otros municipios, con más del 83% con EV "bueno" o superior.	0,09 (menor relación árbol/habitante, posiblemente por urbanizaciones recientes).
E	<i>Melia azedarach</i> , <i>Fraxinus pennsylvanica</i> , <i>Nerium oleander</i>	Segunda mayor proporción de ejemplares jóvenes (DAP < 40 cm).	Mayor proporción de ejemplares con EV "muy bueno".	0,27 (la mayor de todos los municipios)

Nota. Elaborado en base a Terrani Texeira (2014).

Analizando estos trabajos se puede concluir que Terrani Texeira (2014) busca comprender las características generales de la población de árboles en la ciudad, incluyendo su estado vegetativo, distribución, diversidad de especies, etc., mientras que en este trabajo se busca inferir, a partir de denuncias, los factores que contribuyen a la vulnerabilidad de los árboles.

La complementación de estos trabajos radica en que Terrani Texeira (2014) se basa principalmente en aspectos del estado vegetativo, como el vigor de la copa, la presencia de plagas o enfermedades, dasométricos y otros, sin embargo, la resistencia a las tormentas también depende de otros factores, como características intrínsecas de la especie, el desarrollo del sistema radicular, la profundidad del suelo, la presencia de obstáculos subterráneos, etc., además de la ubicación geográfica, microclima, exposición a patrones específicos viento y/o lluvia y otros.

Entonces, la información contrastada de esta investigación y la de Terrani Texeira (2014) no es suficiente para determinar la causa de la aparente contradicción observada entre las tablas 4 y 5, donde el municipio con la mayor tasa de caída también presenta el mejor estado vegetativo.

La Figura 12 muestra la localización de las denuncias agrupadas por CCZ, donde el CCZ 3 presenta la mayor cantidad de denuncias (259); también el CCZ 5 y el CCZ 9. El CCZ 1 presenta la menor cantidad de denuncias (33) dado que

también es el menos arbolado. el CCZ 11 es el que presenta mayor incidencia en árboles caídos respecto al inventario.

Figura 12

Localización de denuncias agrupadas por CCZ



Nota. Elaborado con Microsoft Power Pivot para geolocalización de denuncias por CCZ

A continuación, en la Tabla 6 se presentan las denuncias agrupadas por CCZ y ordenadas en forma decreciente por la tasa de caída.

Tabla 6
Denuncias por Centro Comunal Zonal

Grupo	Denuncias	Inventario	Tasa de caída
CCZ 11	219	9.982	2,19%
CCZ 17	195	9.635	2,02%
CCZ 18	106	5.292	2,00%
CCZ 4	196	10.051	1,95%
CCZ 3	259	14.438	1,79%
CCZ 5	245	15.832	1,55%
CCZ 7	175	12.136	1,44%
CCZ 16	113	7.971	1,42%
CCZ 12	160	11.319	1,41%
CCZ 2	158	11.472	1,38%
CCZ 9	249	18.544	1,34%
CCZ 15	122	9.896	1,23%
CCZ 13	175	14.827	1,18%
CCZ 10	71	6.056	1,17%
CCZ 8	192	18.976	1,01%
CCZ 14	175	18.305	0,96%
CCZ 1	39	4.908	0,79%
CCZ 6	82	11.838	0,69%
Total general	2.931	211.478	1,39%

Del análisis de la Tabla 6 surge que los CCZs con mayor tasa de caída son el 11, el 17 y el 18, que no cuentan con los mayores inventarios ni la mayor cantidad de denuncias.

Estas variaciones en diferentes áreas del departamento pueden estar relacionadas con las características geográficas, los eventos climáticos, así como con las particularidades urbanísticas y del arbolado de cada ubicación. Es fundamental tener en cuenta estas diferencias al planificar medidas de mitigación y preparación para eventos climáticos adversos en cada zona específica.

4.1. ESTUDIO DE DENUNCIAS POR GÉNERO/FAMILIA

Se presentaron un total de 2.698 denuncias a la Intendencia de Montevideo en relación a árboles caídos o en situación de riesgo de caída en las calles de Montevideo. De estas denuncias, se logró identificar el género a 1.871 y 15 a la familia de las Arecáceas, para 890 quedó indeterminada.

En la Tabla 7 se presentan las denuncias agrupadas por género. Es importante notar que los registros de denuncias fueron hechos por particulares, sin especificar la especie o solo con nombre vulgar del árbol. La magnitud de los registros

clasificados como "Sin Dato" está dada por la omisión de la especie y la dificultad posterior en la determinación. La IM no estableció la necesidad de la identificación del género, la especie o incluso el individuo que tienen asignado un código identificador en el censo 2008 (Áreas Verdes & Espacios Públicos y Edificaciones, 2008).

Esta categoría refleja una limitación significativa en la calidad de la información recopilada, lo que puede afectar los análisis y las conclusiones derivadas de los datos.

Tabla 7

Denuncias de caída de árboles por grupo

Grupo	Denuncias
Sin Dato (1)	890
<i>Melia</i>	442
<i>Fraxinus</i>	427
Otras (2)	206
<i>Eucalyptus</i>	190
<i>Schinus</i>	157
<i>Platanus</i>	156
<i>Tipuana</i>	89
<i>Salix</i>	87
<i>Acer</i>	78
<i>Pinus</i>	59
<i>Cupressus</i>	44
<i>Jacaranda</i>	31
<i>Ulmus</i>	29
<i>Populus</i>	28
Arecaceae (3)	15
<i>Nerium</i>	3
Total general	2.931

Nota. (1) denuncias que no se pudo determinar el género. (2) grupo heterogéneo de géneros que no incluye a los grupos mayoritarios. (3) Se usó la familia en lugar del género.

Si bien se pierde precisión al usar géneros, cabe destacar que *Melia*, *Tipuana*, *Jacaranda*, *Schinus*, *Nerium* son representados en el arbolado urbano montevideano por una sola especie, *M. azedarach*, *T. tipu*, *J. obalifolia*, *S. molle* y *N. oleander*, respectivamente. *Platanus*, *Ulmus* y *Fraxinus*, si bien figuran varias especies, una se destaca en el grupo, siendo *P. x acerifolia* (98,5%), *U. procera* (80%), *F. lanceolata* (86,5%).

Los géneros *Acer*, *Eucalyptus*, *Pinus*, *Cupressus* y *Salix* se reparten en 2 o más especies:

- *Acer negundo* (68,5%) y *A. saccharinum* (26,74%)
- *Eucalyptus globulus* ssp *globulus* 64,01%, *E. camaldulensis* 12,56%, *E. robusta* 5,94%, *E. tereticornis* 5,73%
- *Pinus pinaster* 32,54%, *P. radiata* 19,20%, *P. halepensis* 11,42% y otros (*P. ellioti*, *P. taeda*, *P. pinea* y otros)
- *Cupressus sempervirens* 63,85%, *C. macrocarpa* 21,21% y otros (*C. arizonica*, *C. lusitánica* y otros)
- *Salix babylonica* 36,38%, *S. elegantissima* 29,31%, *S. sp.* 11,63%, *S. alba* 10,07%.

En el caso de las palmeras raramente se determinó el género, por lo que se usó la familia. En el censo de 2008 (Áreas Verdes & Espacios Públicos y Edificaciones, 2008) se registraron 2.397 palmeras. La distribución porcentual por especie fue la siguiente:

- 49,35% *Phoenix canariensis*
- 18,11% *Syagrus romanzoffianum*
- 12,22% *Washingtonia robusta*
- 9,80% *Butia odorata*
- 8,76% *Washingtonia filifera*

En la Tabla 8 se presenta la tasa de caída por grupo.

Tabla 8
Tasa de caída

Grupos	Denuncias	Inventario	Tasa de caída (denuncias /inventario)
Sin Dato (1)	890		
<i>Melia</i>	442	4.6063	0,96%
<i>Fraxinus</i>	427	51.396	0,83%
Otras (2)	206	32.538	0,63%
<i>Eucalyptus</i>	190	4.412	4,31%
<i>Schinus</i>	157	5.239	3,00%
<i>Platanus</i>	156	22.304	0,70%
<i>Tipuana</i>	89	11.580	0,77%
<i>Salix</i>	87	6.284	1,38%
<i>Acer</i>	78	9.028	0,86%
<i>Pinus</i>	59	1.349	4,37%
<i>Cupressus</i>	44	863	5,10%
<i>Jacaranda</i>	31	4.736	0,65%
<i>Ulmus</i>	29	4.104	0,71%
<i>Populus</i>	28	3.597	0,78%
<i>Arecáceas</i> (3)	15	2.397	0,63%
<i>Nerium</i>	3	5.588	0,05%
Total general	2.931	211.478	1,39%

Nota. (1) Sin determinación de familia o género. (2) Géneros identificados y agrupados dada su reducida significancia absoluta. (3) Familia, palmeras, no se identificaron géneros.

La comparación de estas proporciones nos permite evaluar el desempeño de cada grupo frente a los temporales y estimar su resistencia o sensibilidad a las tormentas. Estos resultados están influenciados por diversos factores de la especie, del individuo, del ambiente y de las características de las tormentas. Como ejemplo podríamos mencionar la senescencia, el estado sanitario de los individuos, su genética, las condiciones de plantación, el manejo y las intervenciones realizadas en zonas de influencia (obras, compactaciones, edificaciones, zanjos), podas aéreas o de raíces (Alvarado et al., 2012; Clark & Matheny, 2010; Rizzardi & Calvo, 2018). Además, nos permite identificar posibles factores de riesgo o aspectos a considerar en términos de manejo y planificación para reducir el riesgo frente a eventos climáticos adversos (Escalante & Colunga, 2003).

Los registros sin identificación de género (Sin Dato) representan aproximadamente el 30%, un porcentaje significativo que impacta los cálculos sobre el comportamiento de los géneros ante temporales. Es necesario tener en cuenta que las afirmaciones sobre la resistencia o vulnerabilidad ante tormentas son relativas; los datos no identificados pertenecen a algún grupo y pueden inducir a

una sobreestimación de la resistencia o a una subestimación de la sensibilidad a eventos climáticos. Los géneros *Melia*, *Fraxinus*, Otras y *Platanus*, son muy abundantes en la ciudad, y a su vez, presentan bajas tasas de caída, por lo que asignar casos a estos géneros, no implicaría un incremento notable en el índice de caídas. En contraste, géneros como *Cupressus*, *Pinus*, *Schinus* y *Eucalyptus* que son mucho menos frecuentes en las calles, hace que cualquier caso asignable a éstos, implicaría un aumento muy significativo en el valor de la tasa de caída.

Analizando los resultados de la Tabla 8, según la tasa de caída por género, se llegó a estas observaciones:

Melia azedarach tuvo el mayor número de denuncias con 442. Es la segunda especie más abundante en el arbolado de Montevideo, con 46.063 (22%), y presenta una tasa de caída de 0.96%. Indica un buen comportamiento estructural frente a tormentas. Dejó de plantarse activamente por lo que su población ha envejecido, más del 70% tiene DAP (diámetro a la altura del pecho) superior a 40 cm. Según el Censo 2008 (Áreas Verdes & Espacios Públicos y Edificaciones, 2008) el estado vegetativo es malo para el 10.9% de los individuos de esta especie, y regular para el 24.3%. Se distribuye en casi todos los CCZ con una proporción destacada.

Fraxinus registró 427 denuncias. Es el género más abundante, con 51.396 individuos (24%). Registró una tasa de caída de 0,83%. *Fraxinus pennsylvanica* es plantado activamente por la IM (A. Arcos, comunicación personal, como se cita en Terrani Texeira, 2014). El 65% presenta DAP de menos de 40 cm. Presenta un estado vegetativo malo sólo en el 5,68% de su población. Se distribuye en todo el departamento donde ningún CCZ supera el 10%.

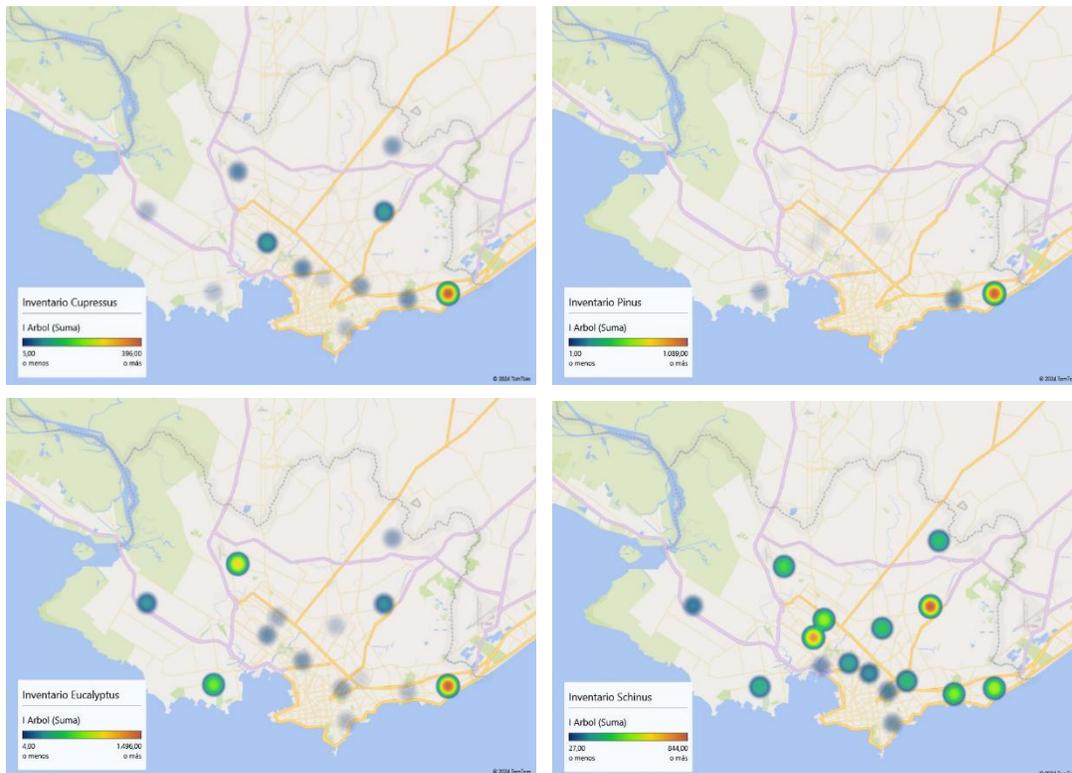
Platanus x acerifolia es una especie muy común en el sur de la ciudad. Registró una reducida tasa de caída del 0,7%. Al ser una especie longeva y no haber sido reemplazada, ha envejecido significativamente; el 86% de los ejemplares supera los 40 cm de DAP, y un 6,8% presenta un estado vegetativo deficiente.

Tipuana tipu muy frecuente en los CCZ 5, 2 y 8, presenta arboles maduros y de gran tamaño. Un 4,5% presenta un estado vegetativo malo. Su tasa de caída es del 0,77% e indicaría resistencia a las tormentas, pero al no ser una especie muy abundante esta afirmación no puede ser categórica.

Los géneros que presentaron mayor tasa de caída son *Cupressus* con 5,1%, *Eucalyptus* con 4,31%, *Pinus* 4,37%, y *Schinus* con 3,0 %. Estos géneros no tendrían buen comportamiento frente a tormentas. Terrani Texeira (2014) menciona a *Schinus molle* y *Eucalyptus globulus* como especies “no adecuadas” por razones de ramas colgantes, follaje persistente y excesivas dimensiones para el caso de *Eucalyptus*. Estas especies presentan estados vegetativos aceptables, del entorno de 96 a 97% de sus individuos con calificación igual o superior a “regular”.

La presencia de *Pinus* y *Cupressus* principalmente es en el CCZ 8 (81% y 45%), *Eucalyptus* principalmente en el CCZ 8 con 34%, el CCZ 12 con 24% y el CCZ 17 con 16%, mientras que *Schinus* se distribuye en todos los CCZ con cierto destaque en el CCZ 9 16% y el CCZ 14 14%. Puede apreciarse en la Figura 13 la presencia muy marcada de estos géneros en algunos CCZ y la ausencia en otros.

Figura 13
Distribución de géneros con alta tasa de caída



Nota. Elaborado con Microsoft Power Pivot para geocalización de denuncias por CCZ

Estos cuatro géneros tienen follaje persistente, lo que significa que mantienen su follaje durante los meses con mayor probabilidad de caída, como septiembre y octubre (61,58% de las caídas registradas en el período estudiado).

Si bien hay omisiones o errores relacionados a la determinación de la especie o género, es posible detectar géneros vulnerables o resistentes a los temporales.

4.2. CARACTERIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE TEMPORALES

En la Tabla 9 se presentan los temporales más relevantes en términos de la cantidad de árboles caídos, los cuales serán objeto de un estudio detallado. Estas tormentas se clasificaron por sus características principales, como su origen, el área afectada y el tiempo de permanencia del fenómeno. Se observa que los ciclones tienen mayor probabilidad de generarse a finales de invierno y principios de

primavera, mientras que las tormentas convectivas se desarrollan con más probabilidad en verano

Tabla 9
Temporales más relevantes

Tipo	Fecha	Denuncias	
		Árboles	Ramas
Ciclón Extratropical	18/09/2012	1.051	269
Ciclón Extratropical	22/10/2012	268	139
Ciclón Extratropical	05/02/2017	233	561
Ciclón Extratropical	13/09/2016	209	68
Ciclón Extratropical	27/10/2016	206	142
Tormenta convectiva	14/12/2015	186	87
Tormenta convectiva	03/01/2017	279	409

4.2.2. Ciclonés Extratropicales

Los ciclones son eventos meteorológicos de gran escala, representan una importante amenaza para el arbolado urbano en Montevideo, dada su ubicación costera y exposición a estos fenómenos.

Según Durañona (2015), Montevideo se encuentra en una región propensa al paso de ciclones extratropicales, también conocidos como "tormentas del Atlántico Sur". Estos sistemas de baja presión pueden generar vientos de gran intensidad, así como lluvias y oleajes, que impactan severamente.

4.2.2.1. Temporal del 18 y 19 de septiembre de 2012

El temporal del 18 y 19 de septiembre de 2012 se destaca como el evento más relevante en el marco de este estudio. Se reportaron 1051 árboles caídos, lo cual evidencia la magnitud de los daños. Solo se reportaron 269 ramas caídas.

Se registraron las mayores velocidades de viento dentro del período estudiado, con rachas de 102 km/h y 93 km/h en las estaciones meteorológicas de Carrasco y Prado, respectivamente (Tabla 10), provenientes del sector S y SW.

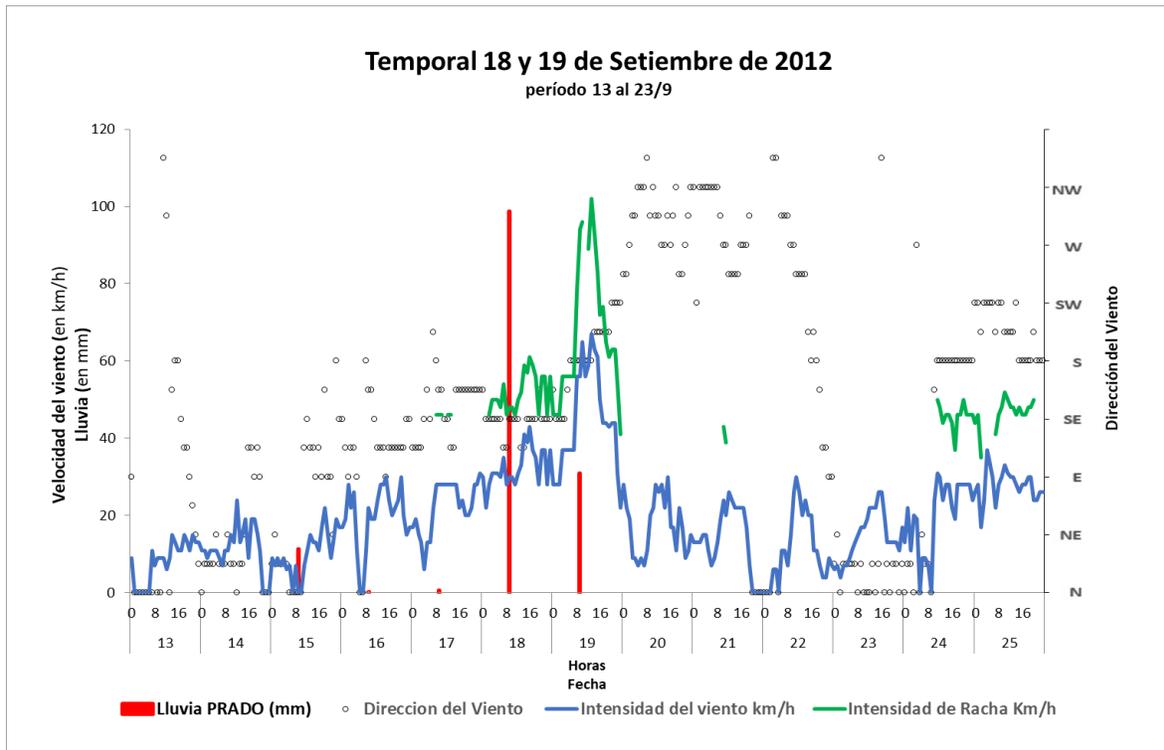
Además, se constató la segunda mayor precipitación diaria del período, con valores de 63 mm y 98,8 mm en Carrasco y Prado, respectivamente. Durante el transcurso del temporal, el acumulado de precipitaciones alcanzó los 129,8 mm en la estación meteorológica de Prado (Figura 15).

Tabla 10*Registro de viento del 19/9/2012, Carrasco*

ESTACIÓN MET. CARRASCO			
Hora	Dirección (sector)	Velocidad media (km/h)	Intensidad Racha (km/h)
9:00	S	56	94
10:00	S	65	96
11:00	S	56	
12:00	S	59	89
13:00	S	67	102
14:00	SSW	63	93
15:00	SSW	61	83
16:00	SSW	50	72

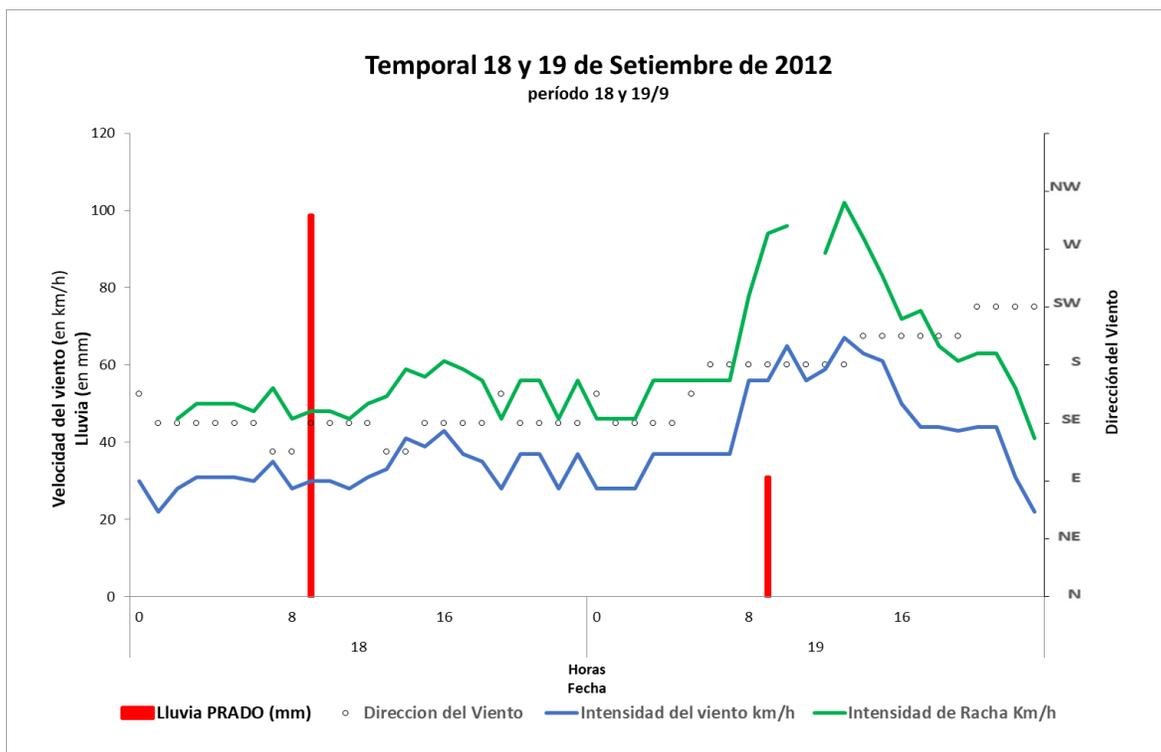
La Figura 14 y la Figura 15 muestran la evolución de la velocidad y dirección del viento medio y las rachas, y de las precipitaciones acumuladas en 24 horas, la primera los 5 días anteriores y 5 días posteriores al temporal, la segunda el detalle durante el temporal.

Figura 14
Gráfico del temporal del 18 y 19/9/2012



Nota. El eje X representa el tiempo. El eje Y izquierdo muestra velocidad del viento en km/h, y la lluvia en mm, y el eje secundario "Y" derecho indica la dirección del viento por sector. La línea azul indica la velocidad media del viento. La verde indica la velocidad de racha. La barra roja representa la lluvia acumulada en 24 horas, medida a las 9am.

Figura 15
Temporal 18 y 19/9/2012. Detalle del evento

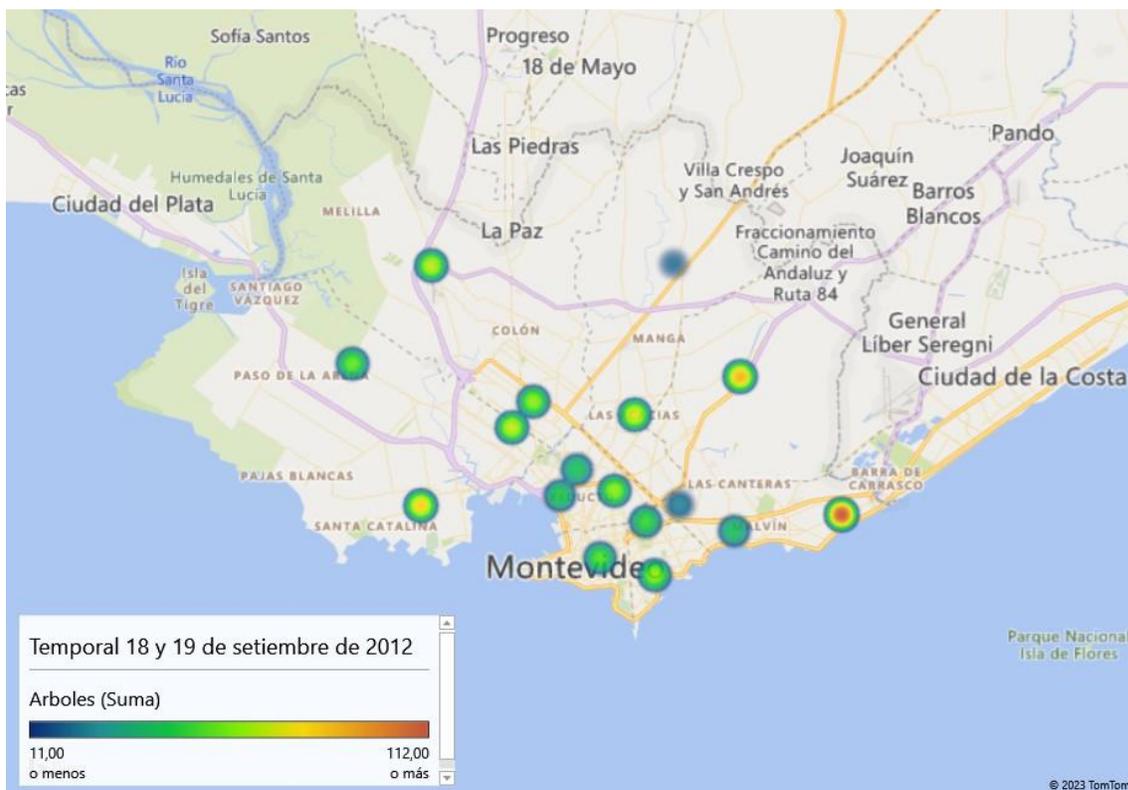


En términos absolutos, los registros más altos de denuncias corresponden a el CCZ 8, con 112 denuncias, el CCZ 9, con 90 denuncias y el CCZ 17, con 83 denuncias (Figura 16).

En términos relativos, medido como tasa de caída, el CCZ 18 con 1,1%, el CCZ 17 con 0,86% y el CCZ 11 con 0,76% fueron los más afectados (Figura 17).

Figura 16

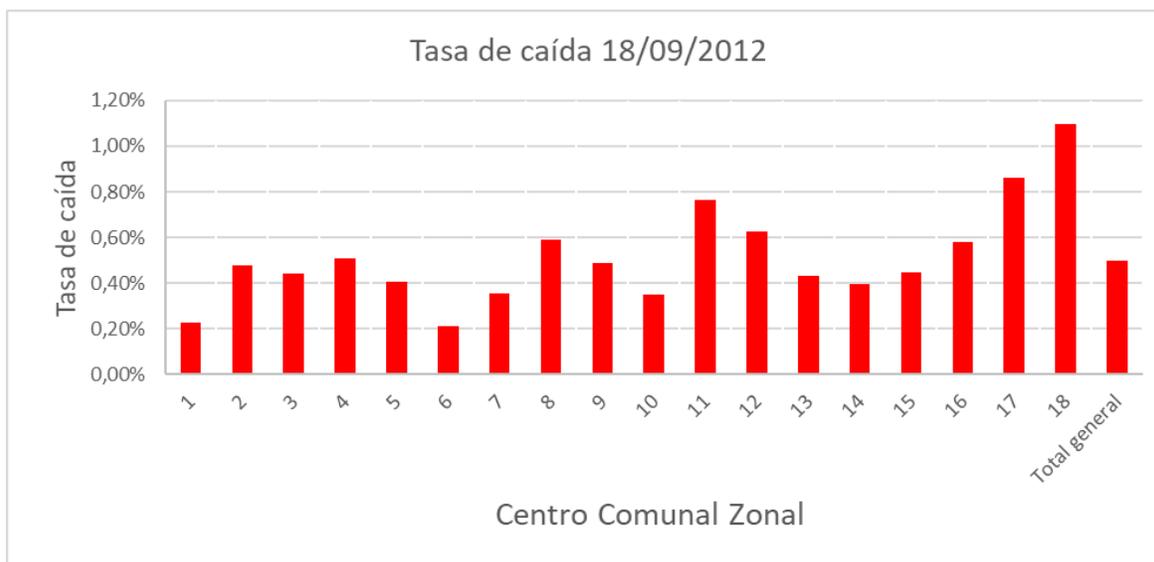
Denuncias de caída de árboles en temporal del 18 y 19/9/2012



Nota. Elaborado con Microsoft Power Pivot para geolocalización de denuncias por CCZ

Figura 17

Tasa de Caída Temporal 18 y 19 set 2012 por CCZ



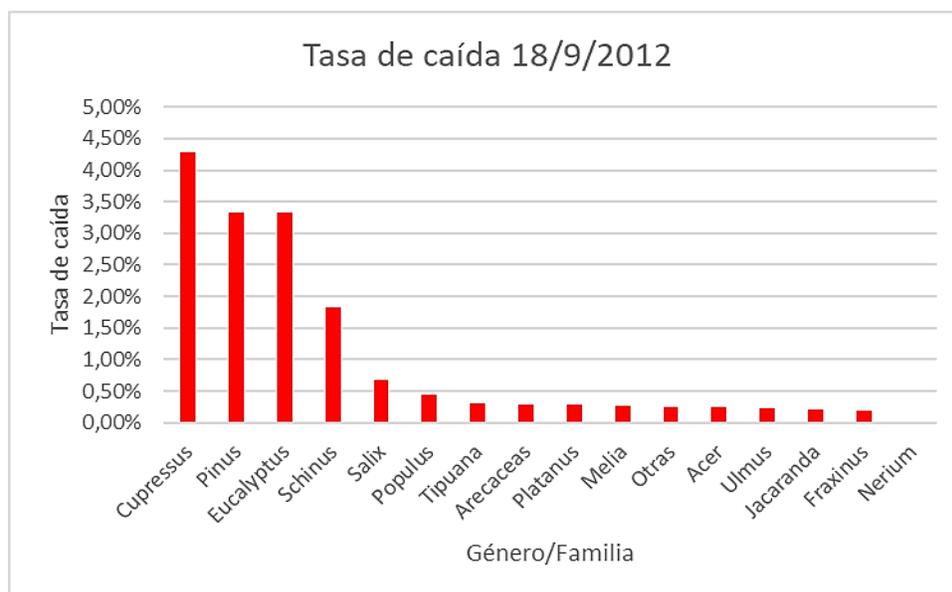
Los datos están en concordancia con lo expuesto en la bibliografía (Duryea et al., 2007; Peltola, 1996), que indican que con vientos superiores a 74 km/h hay daños y por encima de 100 km/h los daños son generalizados.

Es notable la elevada proporción de árboles caídos de los géneros *Cupressus*, *Eucalyptus*, *Pinus* y *Schinus* durante este temporal. El 30,9% de las denuncias fueron identificadas con estos géneros, que representan el 5,6% del inventario. Se observó que la tasa de árboles caídos de *Cupressus* fue de 4,3%, más de ocho veces la tasa general; para *Pinus* y *Eucalyptus* fue de 3,3%, y para *Schinus*, de 1,8% (Figura 18).

Por otro lado, es relevante destacar que *Fraxinus*, *Jacaranda*, *Ulmus* y *Melia*, que presentaron tasas de árboles caídos notablemente bajas, entre 0,2% y 0,25%. Esto sugiere que mostraron una mayor resistencia a los efectos del temporal. Hay 222 denuncias sin especificar el género; incluso si se asignan a los que presentaron menores tasas, los valores resultantes seguirían siendo inferiores a los de *Cupressus*, *Pinus* y *Eucalyptus*.

Figura 18

Tasa de caída de 18/9/2012 por género



Fue determinante en este temporal la velocidad de racha a 102km/h, la dirección S del viento y la pluviometría acumulada durante el mismo, que alcanzó 142 mm en 4 días.

A continuación, se destacan algunas noticias publicadas en la web:

Los meteorólogos calificaron a este fenómeno como un ciclón extratropical. Los vientos llegaron hasta 172 km/h en Punta del Este, 120 km/h en Laguna del Sauce, 103 km/h en Colonia, 102 km/h en San José 102, en Melo 98

km/h, en Tacuarembó 87 km/h, y en Rivera 83 km/h. En Montevideo la máxima fue de 122 km/h. (Tres muertos por el temporal, 2012)

Un fuerte temporal deja dos muertos en Uruguay y seis en Paraguay y Argentina. Los vientos alcanzan velocidades de hasta 150 kilómetros por hora. El mal tiempo ha forzado la suspensión casi total de actividades en Uruguay, donde hay 462 evacuados, 245 de ellos en el entorno de la ciudad de Montevideo, cuyo puerto quedó clausurado durante todo el miércoles. La Dirección Nacional de Meteorología emitió una alerta roja de "riesgo extremo" para el sur y el este uruguayo, y el gobierno recomendó en un comunicado a la población no salir de sus casas ante el peligro de rachas de viento de entre 120 y 150 kilómetros por hora. (Un fuerte temporal, 2012)

4.2.2.2. Temporal del 22-23 de octubre de 2012

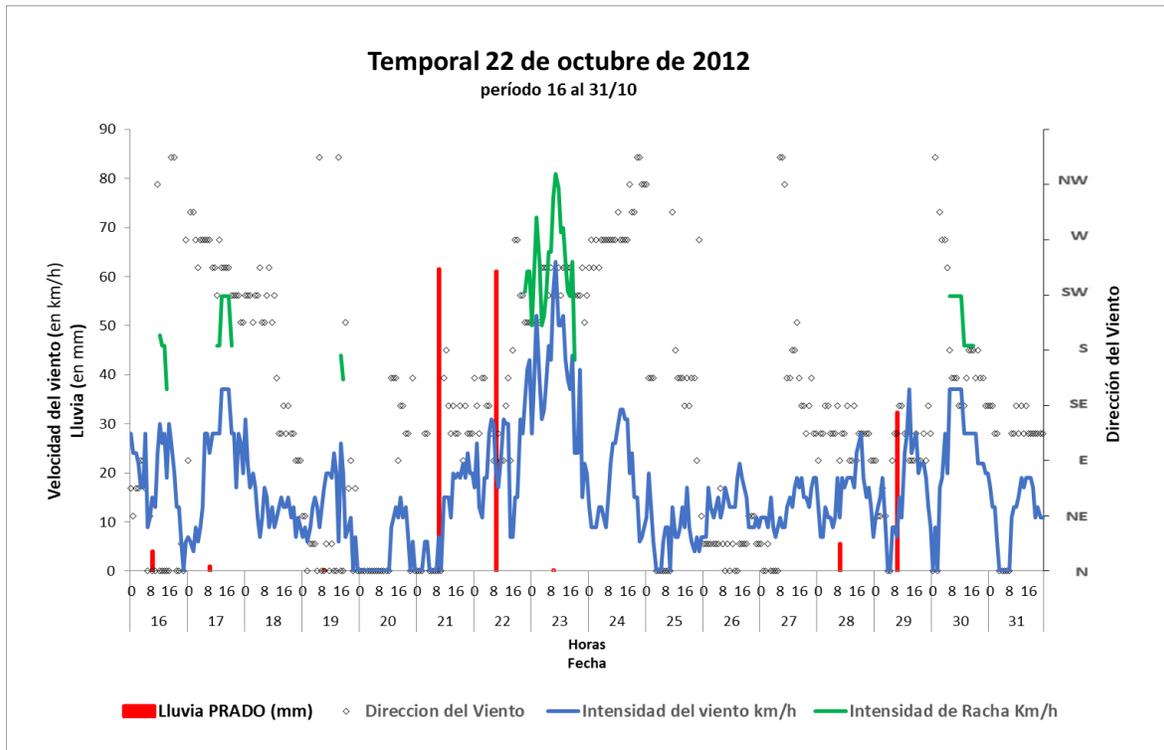
Este temporal se caracteriza por una alta incidencia en la caída de árboles, con un total de 268 casos. Es necesario considerar que este temporal se desarrolló 35 días después del mayor temporal del período estudiado, ocurrido el 18 y 19 de septiembre de 2012. Es lógico pensar que los daños causados por una tormenta pueden aumentar la vulnerabilidad de los árboles a futuras tormentas.

Los CCZs más afectados fueron el CCZ 3 y el CCZ 4, con 34 y 30 denuncias respectivamente (Figura 21), y también marcaron la tasa de caída más elevada, con 0,3% y 0,24% respectivamente. *Fraxinus* presentó altos valores absolutos en estos CCZs, comparados con otros temporales.

Durante el temporal, se registraron velocidades medias superiores a 50 km/h durante tres horas, con ráfagas que alcanzaron más de 76 km/h provenientes del sector SW y WSW. La racha máxima registrada en Carrasco fue de 81 km/h proveniente del Suroeste. Además, se acumularon 122 mm de lluvia durante el evento climático, distribuidos en 61 mm el 21 de octubre y otros 61 mm el 22 de octubre (Figura 19 y Figura 20).

El diferencial de este temporal estuvo dado por el volumen de lluvia registrado, 122 mm, ya que ni la velocidad, ni la dirección ni el tiempo de exposición fueron superiores a los de otros temporales. Es destacable que el acumulado en los 35 días previos fue de 313 mm de precipitaciones. Duryea y Kampf (2007) mencionan la lluvia y el nivel freático como factores coadyuvantes al viento, determinantes en la estabilidad de los árboles. Es difícil asegurar que esta sea la razón de la cantidad de denuncias registradas en este temporal, ya que se carece de evaluaciones de causas de vuelcos, fracturas o descalces.

Figura 19
Gráfico del temporal del 22/10/2012



Nota. El eje X representa el tiempo. El eje Y izquierdo muestra velocidad del viento en km/h, y la lluvia en mm, y el eje secundario "Y" derecho indica la dirección del viento por sector. La línea azul indica la velocidad media del viento. La verde indica la velocidad de racha. La barra roja representa la lluvia acumulada en 24 horas, medida a las 9am.

Figura 20
Temporal del 22/10/2012 – detalle del evento

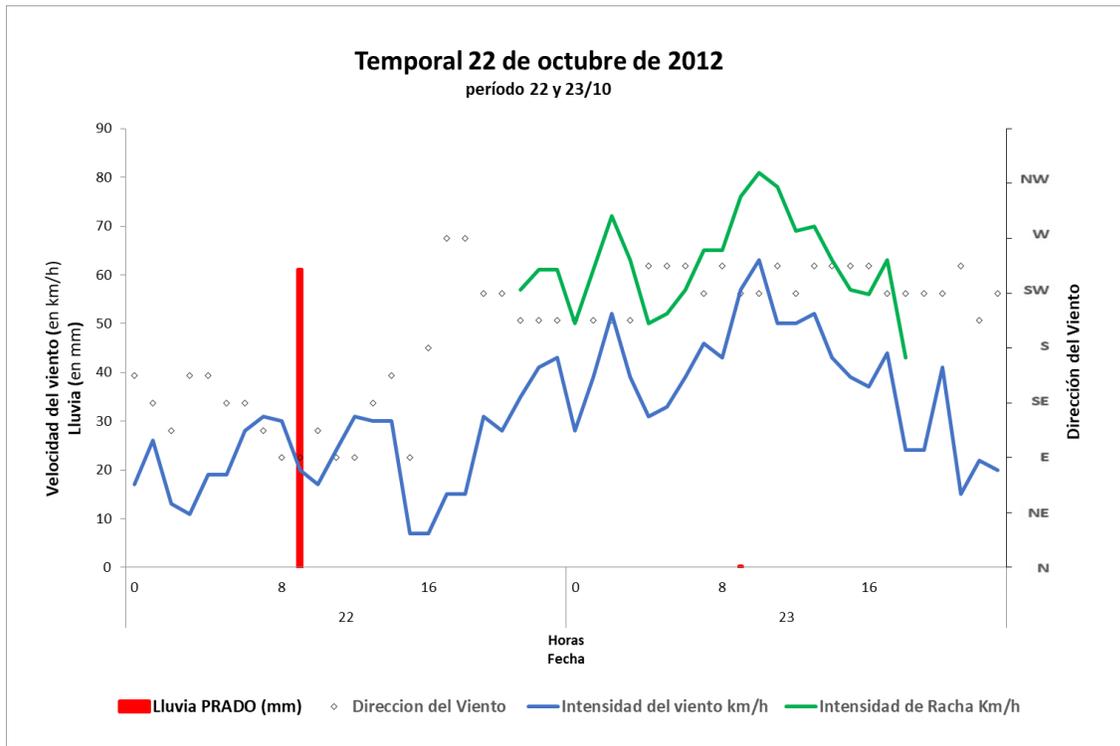
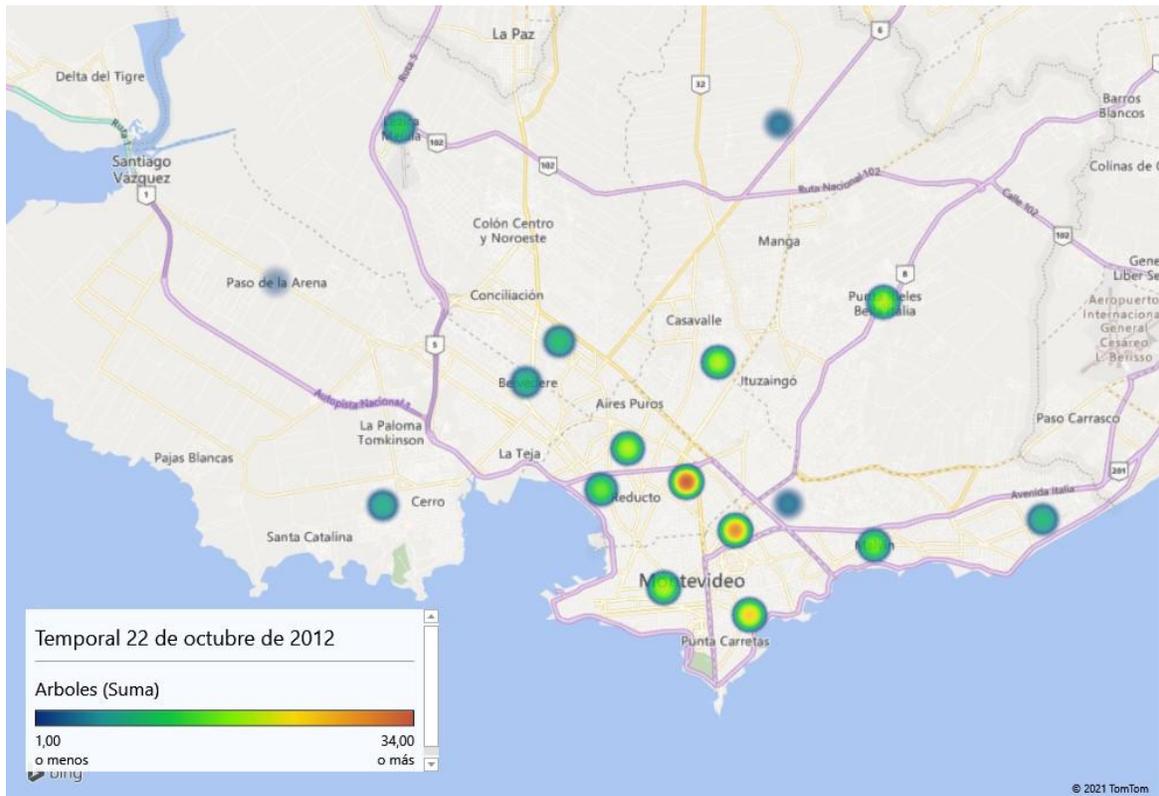


Figura 21

Denuncias de caída de árboles por CCZ - 22/10/2012



Nota. Elaborado con Microsoft Power Pivot para geolocalización de denuncias por CCZ

No se encontraron diferencias tan marcadas en términos tasa de caída por grupo (Figura 22), donde *Cupressus*, *Pinus* y *Eucalyptus* tienen los valores superiores.

Figura 22*Tasa de caída temporal 22/10/2012*

A continuación, se destacan algunas noticias publicadas en la web:

...cyclón extra tropical intenso en Uruguay para el martes. La Dirección Nacional de Meteorología elevó a su máxima categoría de peligro ("alerta roja") la advertencia por lluvias intensas y vientos que podrían superar los 100 kilómetros horarios, lo que podría ocurrir en principio hasta el atardecer de mañana martes. (Alertan por un "cyclón extra tropical intenso", 2012)

"En Montevideo casi 100 árboles caídos. Un árbol cayó sobre un vehículo con un pasajero dentro quien quedó atrapado en el interior en Lezica, y resultó fracturado en su pierna" (Lluvias y pasos cortados, 2012, párr. 12).

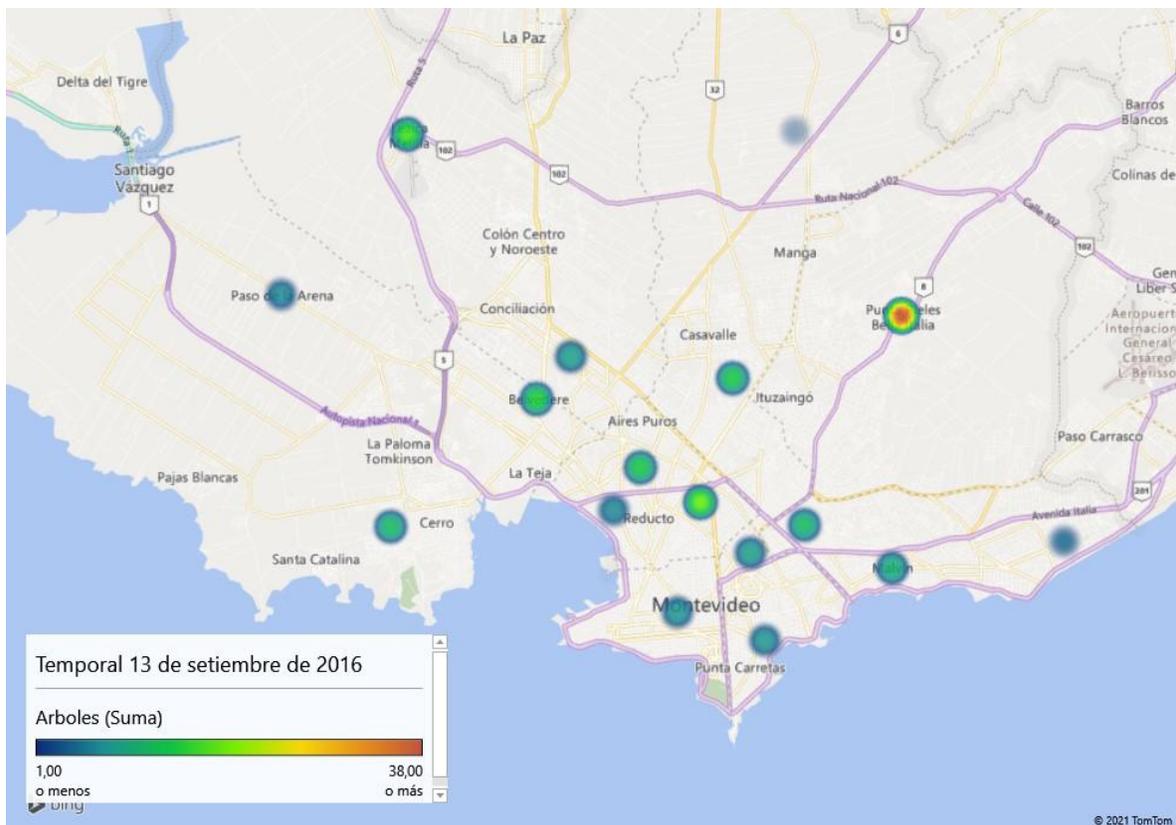
"El temporal de viento dejó a más de 30.000 hogares sin energía eléctrica, de los cuales 17.000 eran afectados de Maldonado" (Lluvias y pasos cortados, 2012, párr. 13).

4.2.2.3. Temporal del 13 y 14 de setiembre de 2016

En este temporal se registraron 209 árboles caídos, destacándose el CCZ 9 con 38 casos (Figura 23). En los CCZ 12, 15, 11 y 18, hubo un efecto moderado, mientras que en los CCZ 10, 5, 13 y 8, el impacto fue reducido, ambos medidos como tasa de caída.

Figura 23

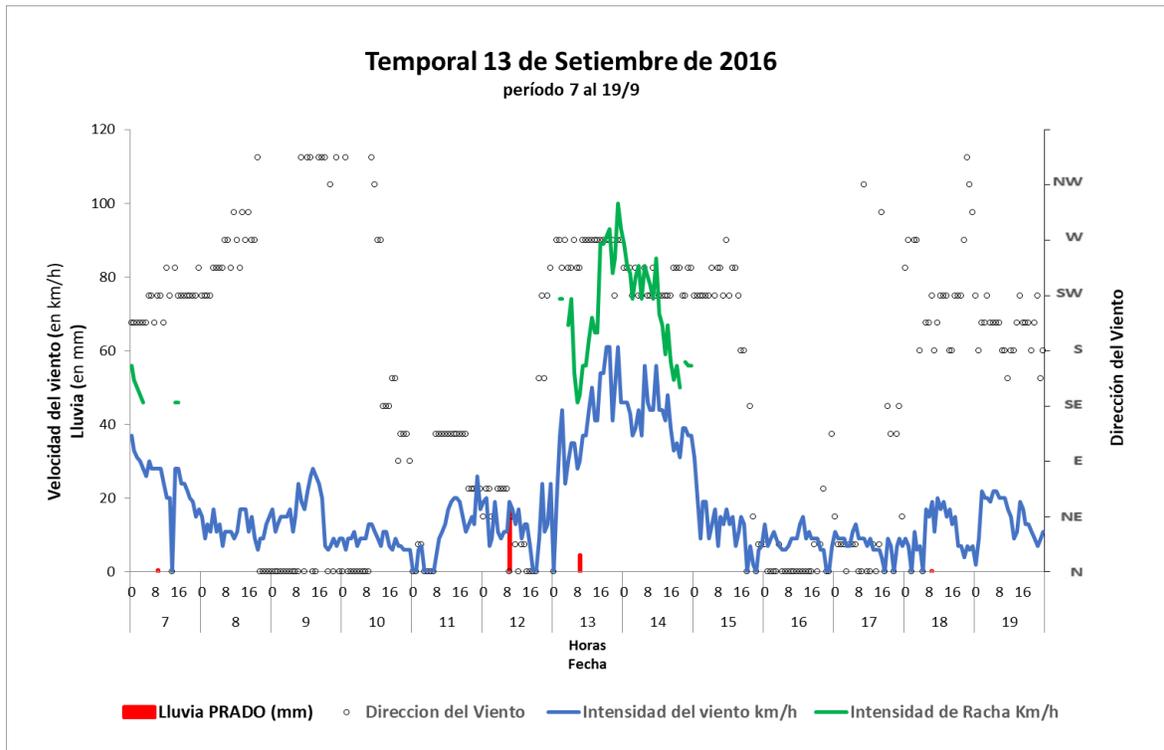
Denuncias de caída de árboles por CCZ - 13/9/2016



Nota. Elaborado con Microsoft Power Pivot para geolocalización de denuncias por CCZ

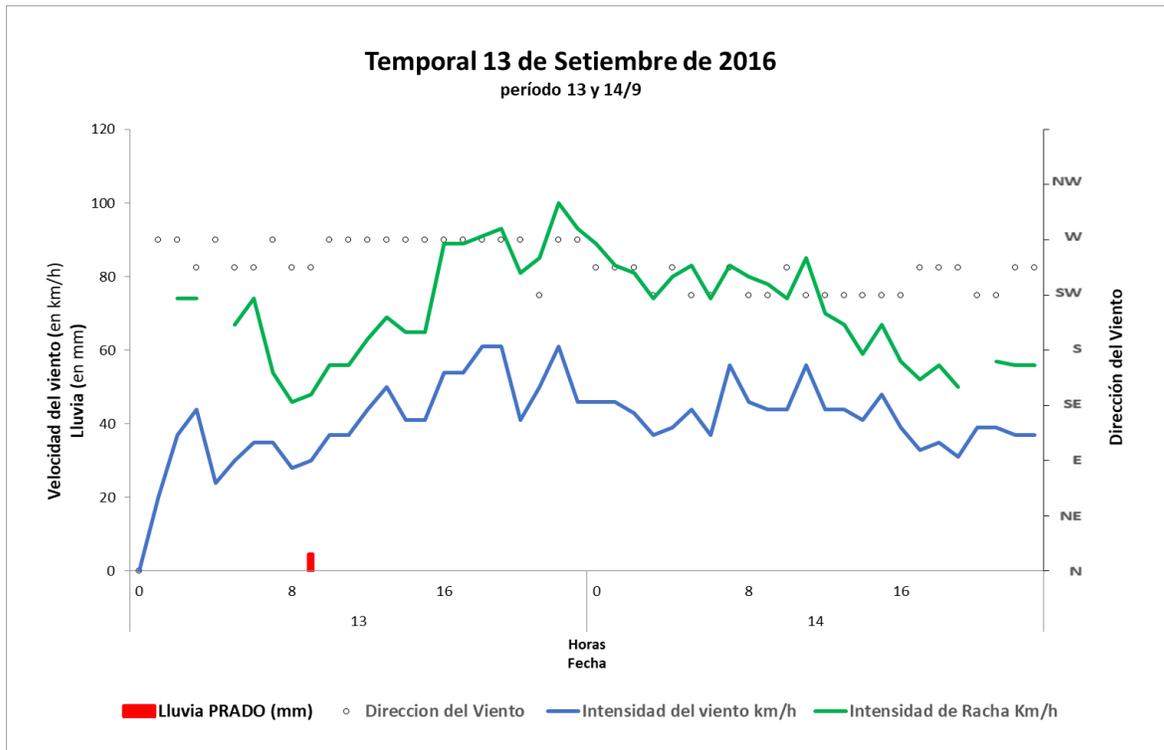
La lluvia durante el temporal fue de 22,1 mm y 30,2 mm, y en los 20 días previos se acumularon 175 mm y 140 mm en Carrasco y Prado respectivamente. El viento provenía del sector W, WSW y SW, con más de 24 horas de rachas superiores a 70 km/h y picos de 80 a 100 km/h (Figura 24 y Figura 25).

Figura 24
Gráfico del temporal del 13/9/2016

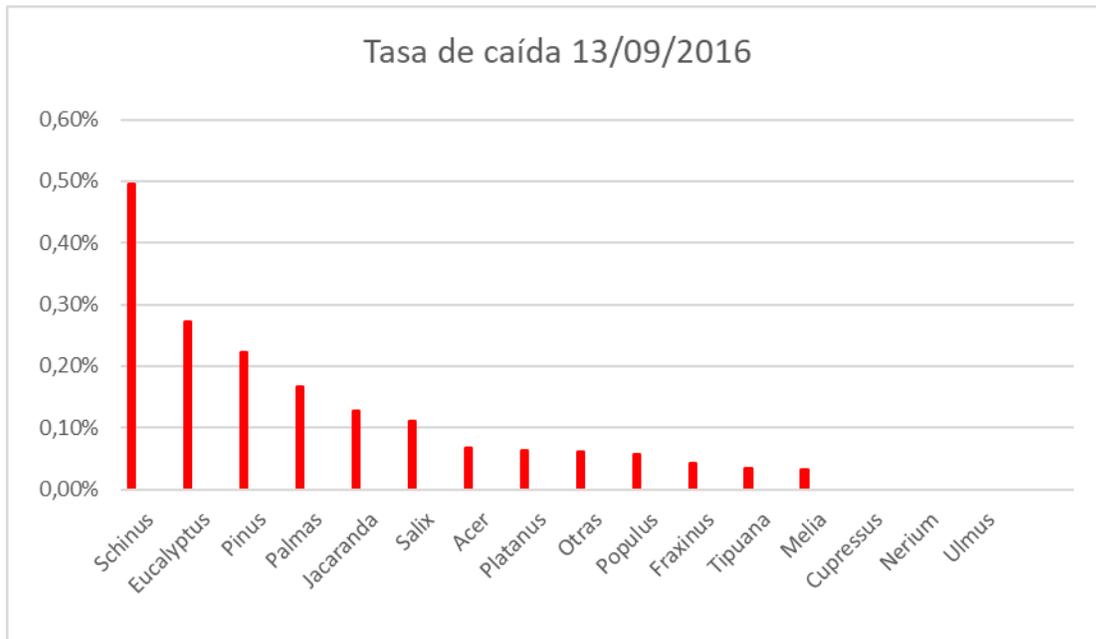


Nota. El eje X representa el tiempo. El eje Y izquierdo muestra velocidad del viento en km/h, y la lluvia en mm, y el eje secundario "Y" derecho indica la dirección del viento por sector. La línea azul indica la velocidad media del viento. La verde indica la velocidad de racha. La barra roja representa la lluvia acumulada en 24 horas, medida a las 9am.

Figura 25
Temporal del 13/9/2016 - detalle del evento

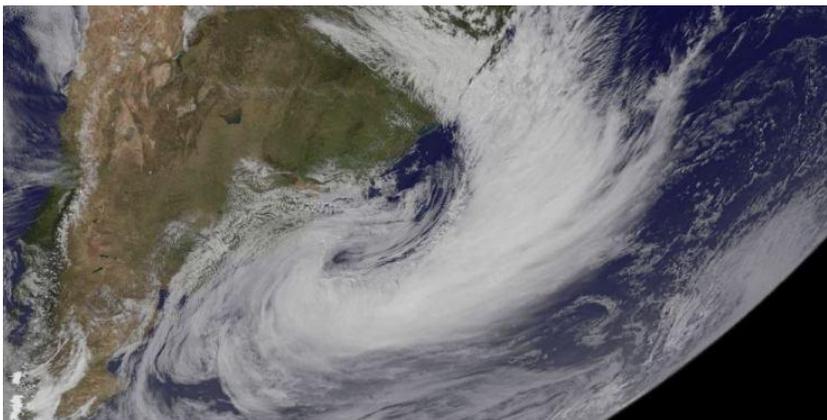


Es destacable el impacto que tuvo este temporal en los árboles de *Schinus*, que, a pesar de representar solo el 2,44% del inventario, tuvieron una proporción considerable de casos reportados, alcanzando el 18,6% de los casos identificados. Además, se observó que tanto *Pinus* como *Eucalyptus* también sufrieron daños significativos. Por otro lado, *Melia*, *Tipuana* y *Fraxinus* mostraron un buen desempeño relativo (Figura 26).

Figura 26*Tasa de caída temporal 13/9/2016*

A continuación, se destacan algunas noticias publicadas en la web:

Los fuertes vientos generaron una "situación de emergencia" en el tránsito de la ciudad, dijo a El Observador el director de Tránsito de la comuna, Pablo Ferrer. Se registraron semáforos apagados, ramas y árboles caídos en distintos puntos, que dificultaban la circulación. (Un muerto, destrozos y miles de usuarios, 2016)

Figura 27*Enorme ciclón extratropical sobre la provincia de Buenos Aires*

Nota. Tomado de Imagen satelital muestra el enorme ciclón (2016).

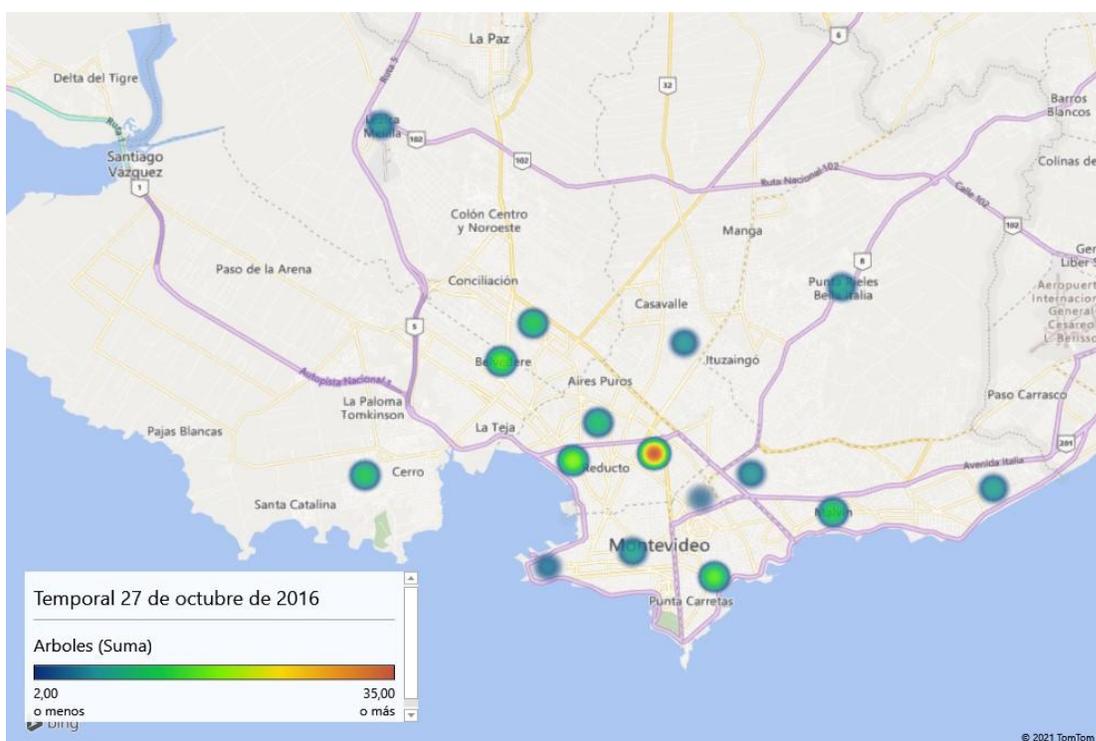
Según Metsul las salidas recientes de los modelos indican una presión mínima en el centro del sistema de 960 Hpa, lo que hace que este ciclón sea uno de los más intensos vistos en la historia reciente en el Atlántico Sur. (Imagen satelital muestra el enorme ciclón, 2016).

4.2.2.4. Temporal del 27 de octubre de 2016

Durante este temporal, se registraron un total de 206 denuncias de árboles caídos. Estas caídas ocurrieron en todos los CCZs, destacándose el CCZ 3 con el mayor número de casos, con 35 reportes (Figura 28). Al evaluar la tasa de caída, el CCZ 16 y el CCZ 3 fueron los más relevantes con 0,24%, el CCZ 10 y el CCZ 18 menos de 0,04%. Los demás CCZs tuvieron resultados intermedios sin superar 0,13%.

Figura 28

Denuncias de caída de árboles por CCZ - 27/10/2016



Nota. Elaborado con Microsoft Power Pivot para geolocalización de denuncias por CCZ

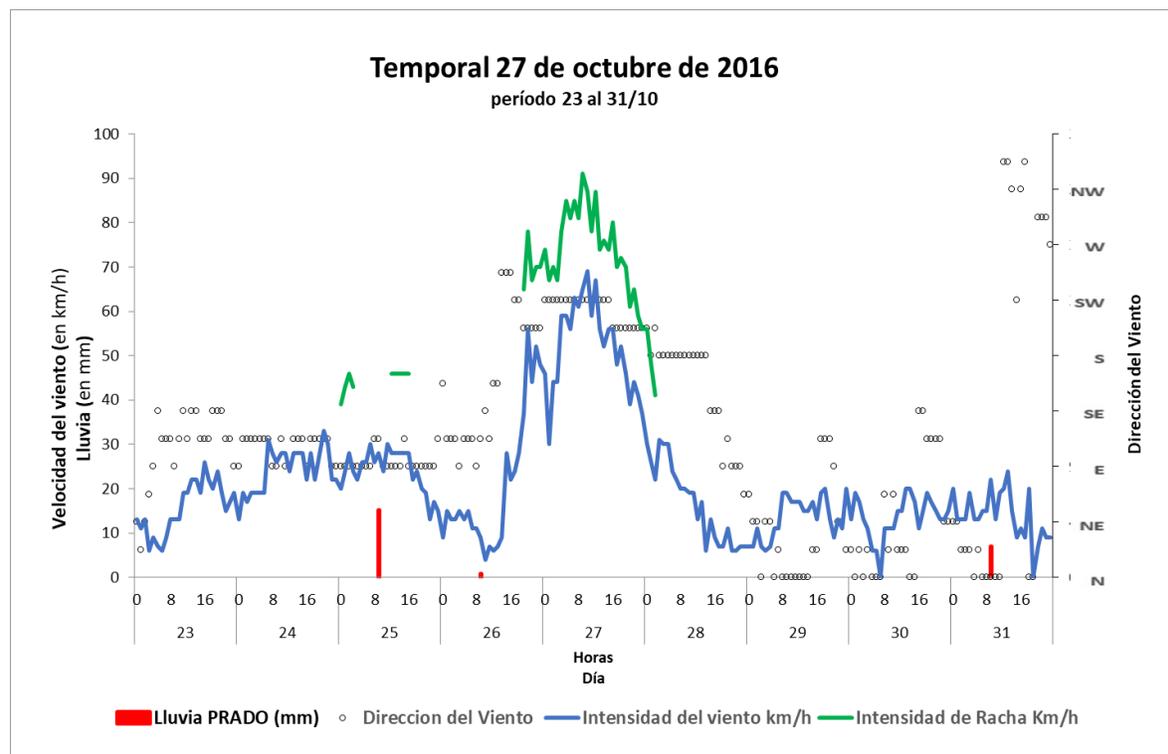
Es importante tener en cuenta que 8 días antes, el 19 de octubre de 2016, se produjo otro temporal en el que se registraron 46 árboles caídos. Este evento previo podría haber dejado secuelas que contribuyeron a la situación durante el temporal del 27 de octubre.

El evento se caracterizó por vientos persistentes del SW, con 8 horas de rachas superiores a 80 km/h, alcanzando picos de hasta 91 km/h. La lluvia fue escasa, con un total de 15 mm (Figura 29 y Figura 30).

El temporal anterior, del 19 de octubre, presentó rachas de no más de 56 km/h del sector ESE y lluvias acumuladas de 67 mm en los días 18, 19 y 20 de octubre, medidas en Prado. En ambos temporales, las temperaturas registradas fueron de 15°C de máxima y 8°C de mínima, contrastando con las temperaturas medias máximas y mínimas de 20°C y 15°C respectivamente para ese mes.

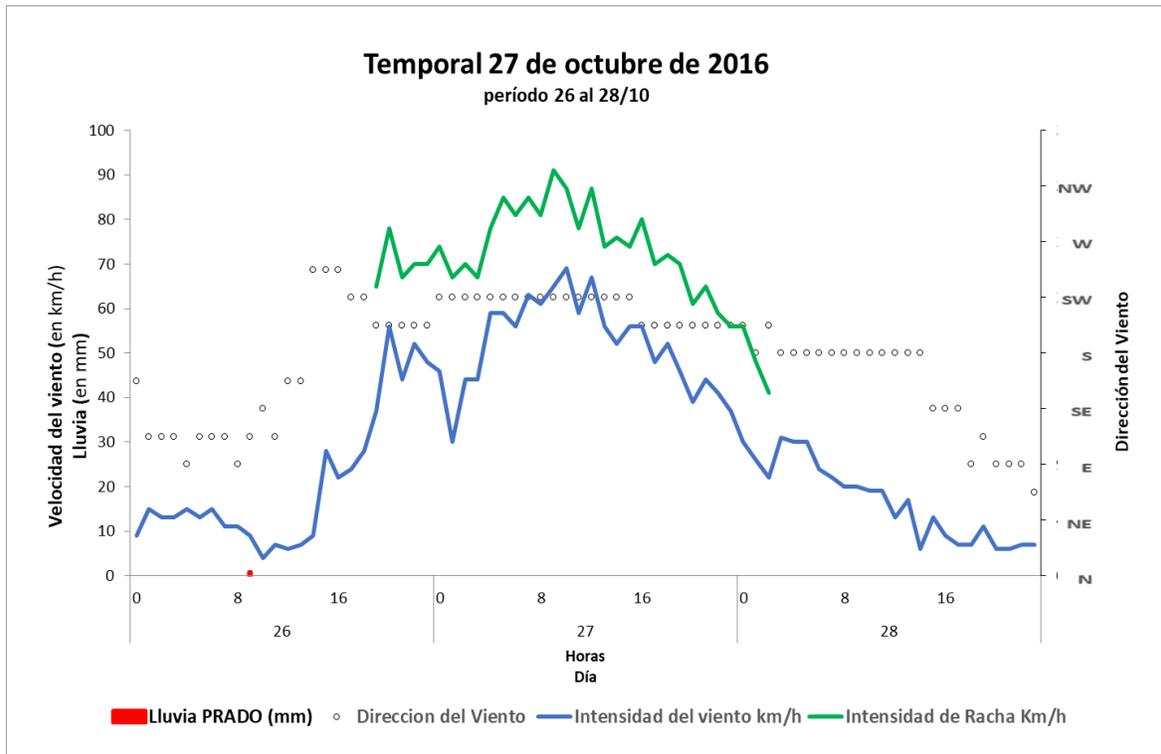
Figura 29

Gráfico del temporal del 27/10/2016



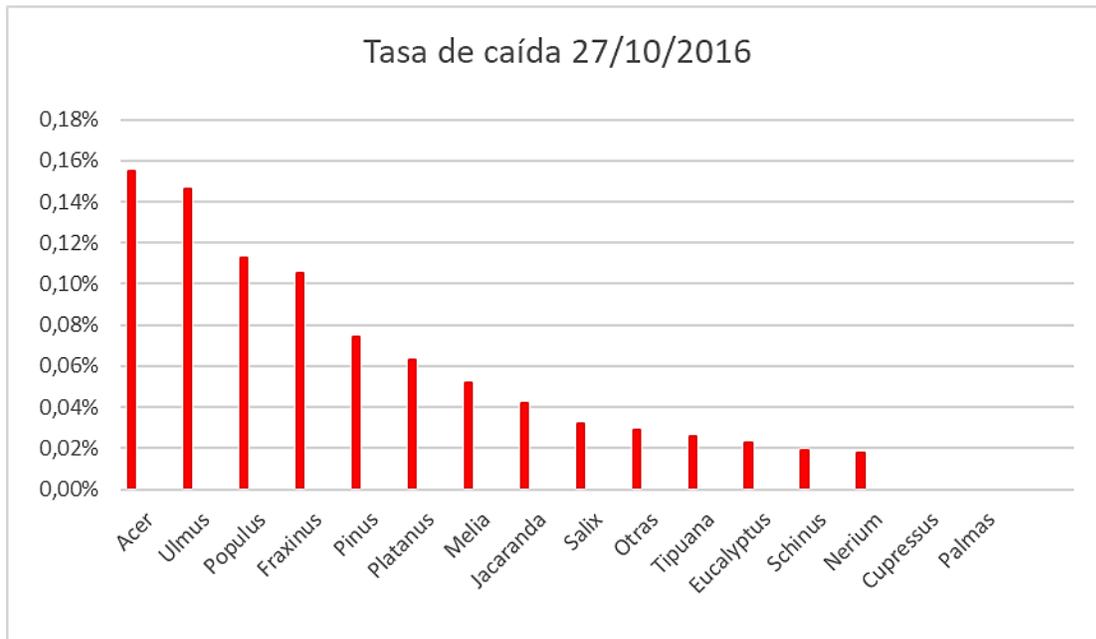
Nota. El eje X representa el tiempo. El eje Y izquierdo muestra velocidad del viento en km/h, y la lluvia en mm, y el eje secundario "Y" derecho indica la dirección del viento por sector. La línea azul indica la velocidad media del viento. La verde indica la velocidad de racha. La barra roja representa la lluvia acumulada en 24 horas, medida a las 9am.

Figura 30
Temporal del 27/10/2016 - detalle del evento



Es interesante destacar que los géneros *Acer*, *Ulmus* y *Fraxinus* presentaron la mayor tasa de caída, principalmente en el CCZ 3 (Figura 31), y lo reducido de la tasa para *Cupressus*, *Schinus* y *Eucaliptus*.

Figura 31
Tasa de caída temporal 27/10/2016



A continuación, se destacan algunas noticias publicadas en la web:

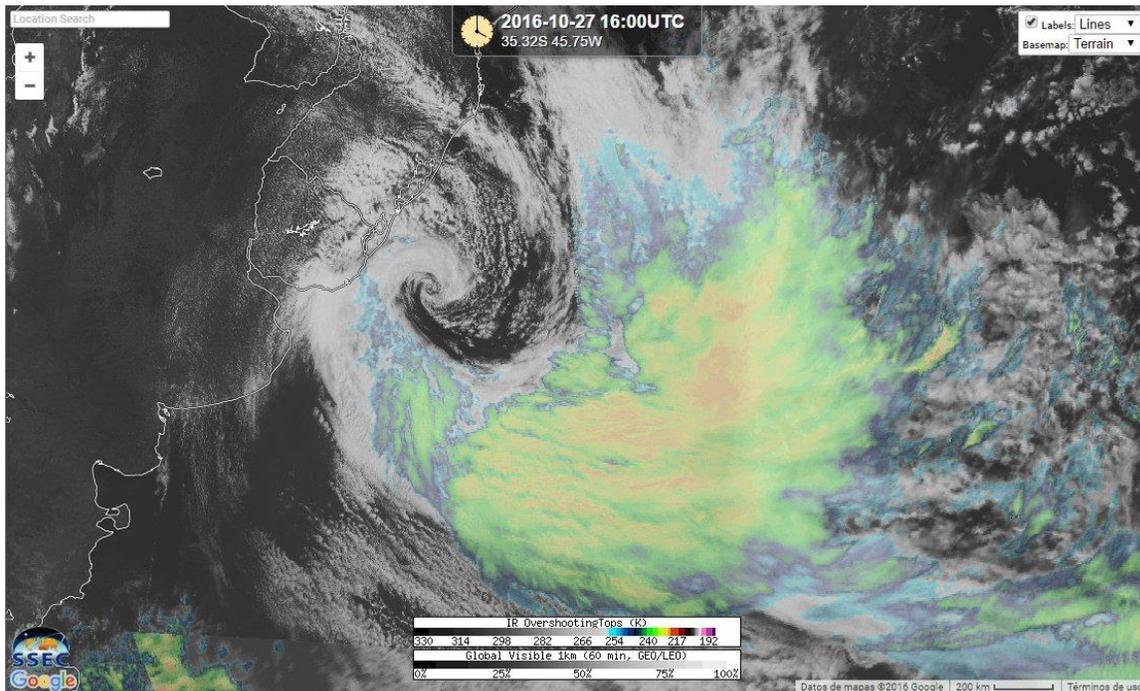
En la madrugada de ayer los vientos alcanzaron rachas de 113 y hasta 117 kilómetros por hora, según los registros de la terminal de carga del Puerto de Montevideo. El temporal que persistió hasta la tarde de ayer provocó que el agua tomara parte de la terminal. (*Secuelas de un temporal anunciado, 2016*)

En varias zonas de Montevideo los fuertes vientos provocaron la caída de árboles. En la tarde de ayer, de acuerdo al coordinador del Centro de Emergencia Departamental (Cecoed), Jorge Cuello, eran 163 los árboles que no soportaron el ciclón extratropical. (*Secuelas de un temporal anunciado, 2016*)

Según el ente, “el temporal y los fuertes vientos que vienen afectando las zonas Sur y Este del país han producido daños en las redes de UTE, debido a la caída de árboles y ramas sobre las líneas del tendido eléctrico, así como por la propia acción del viento”. (Unos 38 mil usuarios de Ute, 2016)

En la Figura 32 puede interpretarse la gran extensión en superficie del ciclón, el centro del espiral sobre el Atlántico que gira en sentido horario, con bandas de nubes de gran desarrollo asociado con condiciones de mal tiempo.

Figura 32
Imagen satelital 27/10/2016



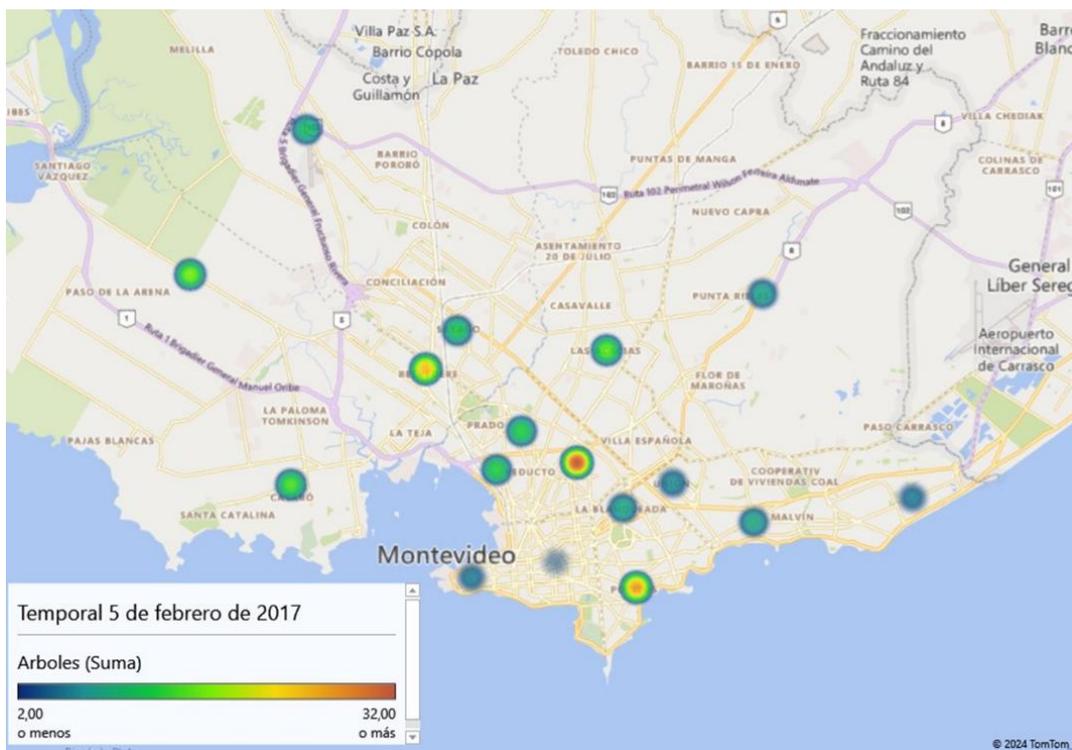
Nota. Tomado de Gale (2016).

4.2.2.5. Temporal del 5 de febrero de 2017

Este ciclón extratropical es inusual debido a su fecha de ocurrencia. Normalmente, son más probables a finales de invierno y principios de primavera.

Se recibieron un total de 233 denuncias de caídas de árboles, distribuidas en todos los Centros Comunales Zonales. Sin embargo, el CCZ 3 (32), el CCZ 5 (27) y el CCZ 14 (25) fueron los lugares donde se reportaron la mayoría de las caídas. Son muy arbolados; cuentan con el 23% de inventario y registraron el 36% de las denuncias (Figura 33).

Figura 33
Denuncias de caída de árboles por CCZ - 5/2/2017



Nota. Elaborado con Microsoft Power Pivot para geolocalización de denuncias por CCZ

En cuanto a los géneros más afectados, se destacan *Fraxinus*, con 44 denuncias, y *Melia*, con 55 denuncias. Además, se observa que los árboles del género *Eucalyptus* superan al resto en términos de la tasa de caída (Figura 36).

Este temporal también se destaca por las 561 denuncias de ramas caídas, con una distribución similar por CCZ. Solo el 25% (144) tiene asignada la especie, por lo que no es prudente hacer deducciones. El género más denunciado fue *Melia*, con 51 registros.

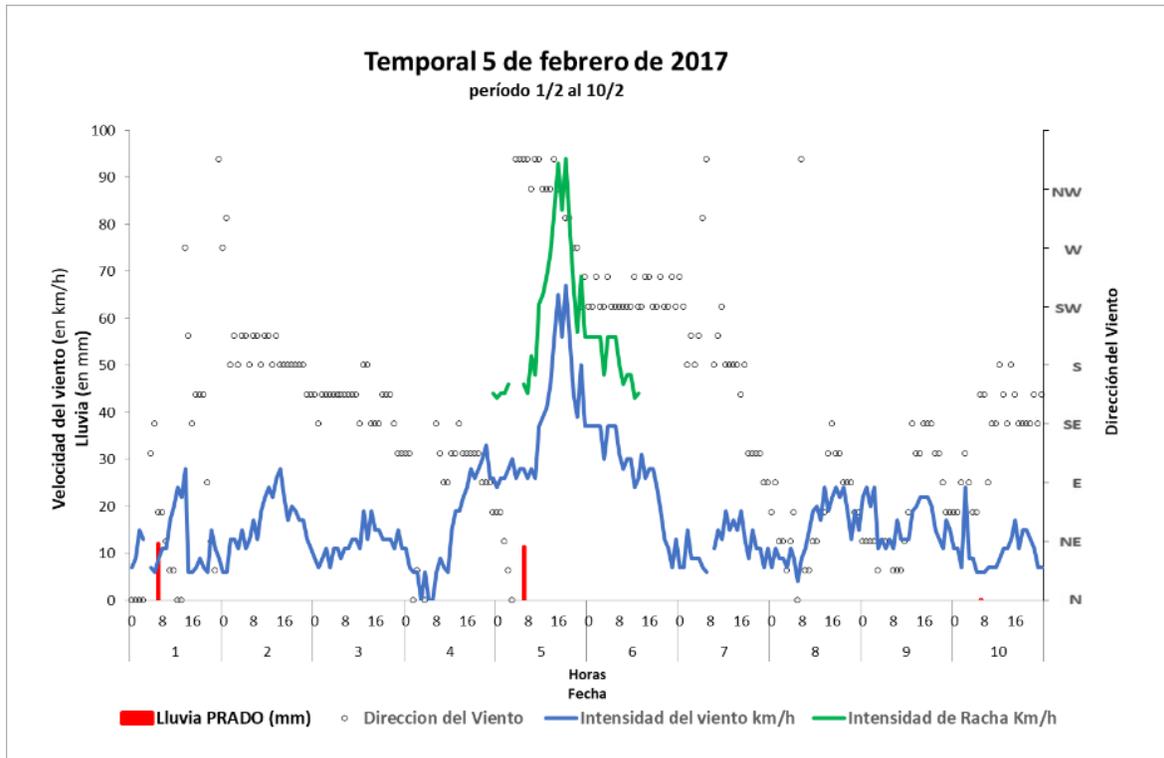
La ocurrencia de un ciclón extratropical tardío con vientos fuertes tuvo un impacto significativo en los árboles, especialmente en las especies *Melia* y *Fraxinus*. Probablemente, el máximo desarrollo foliar y reproductivo de estos árboles, en pleno verano, haya afectado su capacidad de resistencia. En la consultoría de Bozzo (2021) se menciona que la mayor densidad del follaje afecta la capacidad del viento para penetrar sus capas, por lo que sería lógico pensar que, con mayor desarrollo foliar, habría mayor resistencia al paso del viento.

En comparación con otros temporales, este no destaca por la velocidad del viento (93-94 km/h), ni por el tiempo de exposición de 6 horas con vientos mayores a 80 km/h, ni por el volumen de precipitaciones de 23 mm acumulados en 5 días

(Figura 34 y Figura 35). Sin embargo, se diferenci3 en la 3poca del a3o y, por ende, en el desarrollo fenol3gico y tambi3n en la direcci3n del viento (NNW, NW y WNW).

Figura 34

Gr3fico del temporal del 5/2/2017



Nota. El eje X representa el tiempo. El eje Y izquierdo muestra velocidad del viento en km/h, y la lluvia en mm, y el eje secundario "Y" derecho indica la direcci3n del viento por sector. La l3nea azul indica la velocidad media del viento. La verde indica la velocidad de racha. La barra roja representa la lluvia acumulada en 24 horas, medida a las 9am.

Figura 35
Temporal del 5/2/2017 – detalle del evento

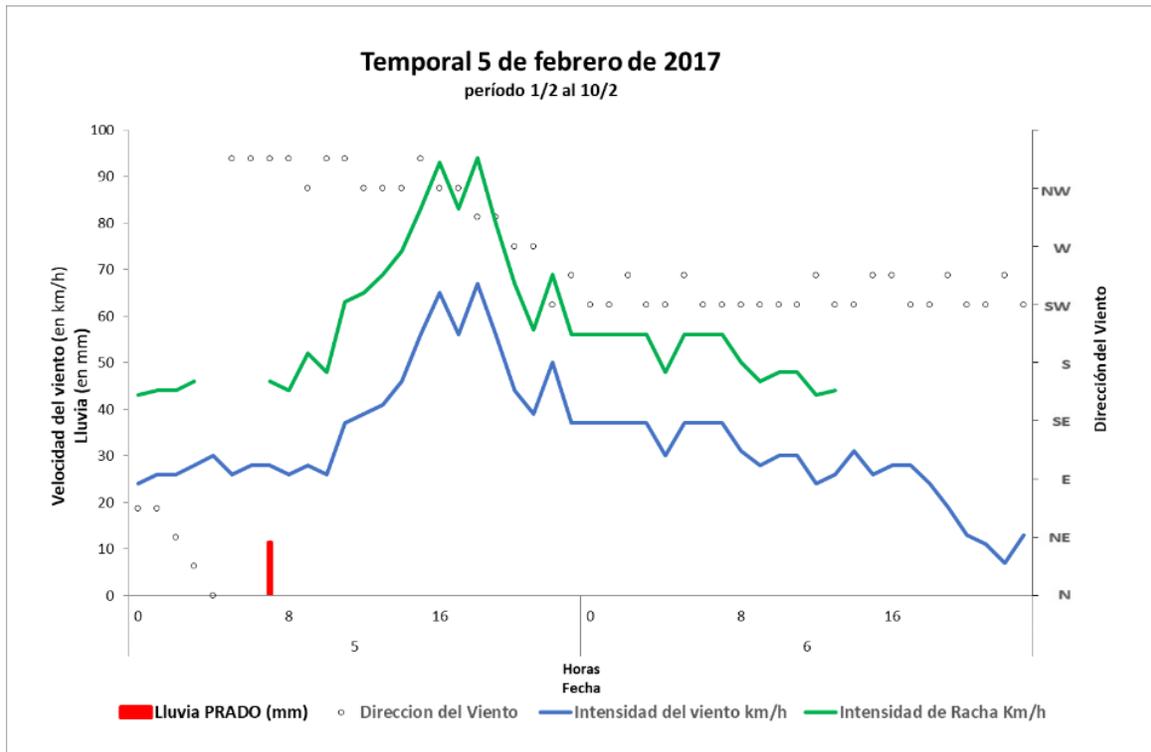
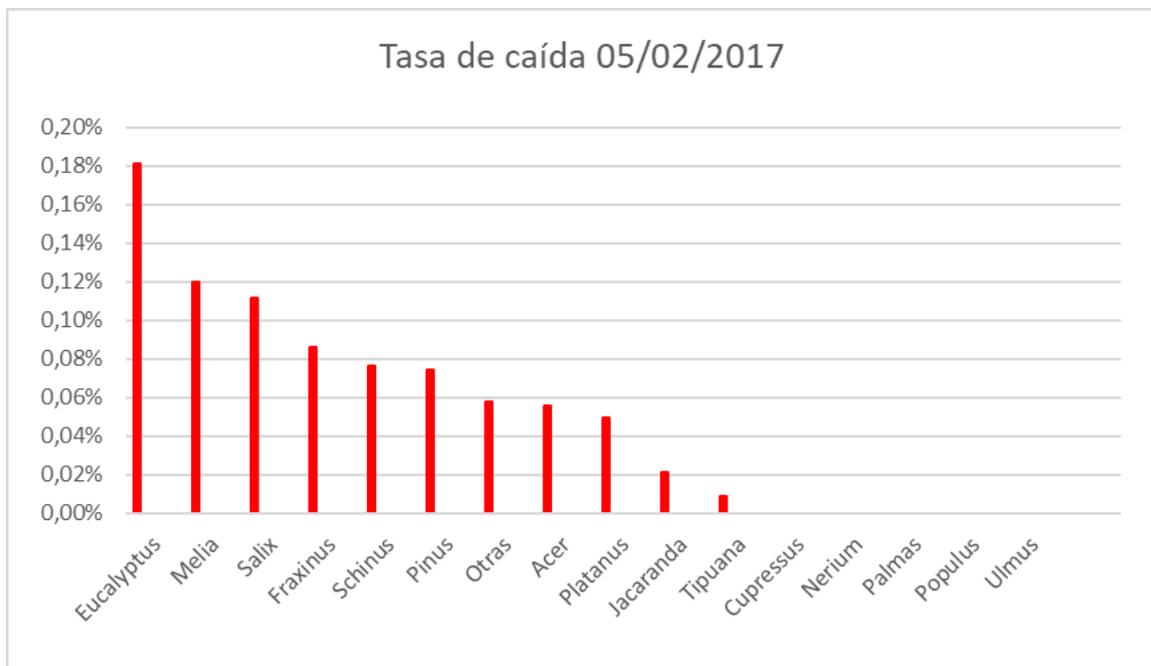


Figura 36
Tasa de caída Temporal 5/2/2017



A continuación, se destacan algunas noticias publicadas en la web:

El día 4/2 un sistema de baja presión comenzó a afectar al país en la región norte y litoral con precipitaciones y tormentas. El día 5/2 el centro del ciclón extratropical se encontraba ubicado en la provincia de Buenos Aires y luego comenzó a profundizarse, afectando con vientos fuertes principalmente en zonas costeras. Este sistema tuvo un lento desplazamiento, provocando una persistencia de aproximadamente 24 horas con vientos fuertes, los que afectaron siempre la misma región. (Instituto Uruguayo de Meteorología, 2017)

El ciclón extratropical que azotó este domingo 5 de febrero a gran parte del país produjo grandes destrozos en varias zonas de Montevideo, . . . rachas de vientos de más de 120 kilómetros por hora y produjo grandes destrozos en gran parte de Montevideo y también en el interior, caída de árboles, voladura de techos, semáforos rotos y alrededor de 25.000 clientes de UTE permanecen aún sin energía eléctrica. (Lo que el viento nos dejó, 2017)

Los efectos del temporal que tuvo lugar la tarde y noche de este domingo en el sur y sureste del país se sintieron en distintos departamentos y aún se están evaluando los alcances del mismo. Árboles caídos, semáforos dañados y calles con afectaciones estructurales son algunas de las consecuencias de las torrenciales lluvias y vientos de hasta 120km/h. (Temporal: 65 mil hogares quedaron sin luz, 2017)

4.2.3. Tormentas convectivas

Además de los ciclones extratropicales, las tormentas convectivas representan otro fenómeno meteorológico que puede tener un impacto significativo en el arbolado urbano.

Montevideo se encuentra expuesta a la formación y paso de tormentas convectivas, caracterizadas por la generación de fuertes ráfagas de viento, precipitaciones intensas y en ocasiones, incluso granizo (Durañona, 2015). Estos eventos ocurren durante el verano cuando son más probables, y como se puede observar en los gráficos y tablas, tuvieron consecuencias significativas en el arbolado y en la infraestructura de la ciudad.

Bonilla (2018) explica que son de complejo estudio debido a que suelen ser fenómenos de corta duración y pueden desarrollarse y disiparse rápidamente. Las estaciones meteorológicas convencionales pueden no tener la resolución temporal ni espacial, necesaria para capturar estos eventos breves. Están distribuidas de manera que cubren grandes áreas, entonces una tormenta puede ocurrir en un área que no está directamente monitoreada por una estación.

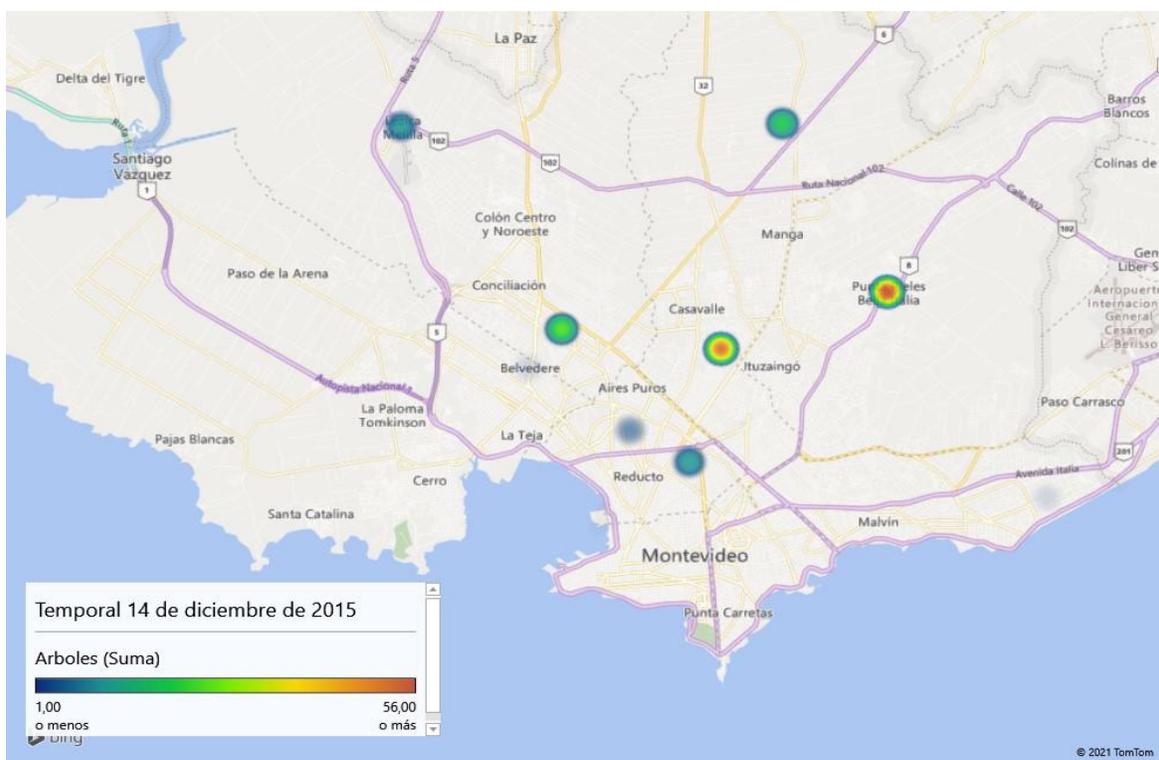
Hay pocos registros disponibles, ya que son de duración inferior a las mediciones realizadas en intervalos de 10 minutos, el área afectada es muy acotada, como referencia Durañona (2015) habla de 100 km².

4.2.3.1. Temporal del 14 de diciembre de 2015

El registro de denuncias para esta tormenta fue de 186 árboles caídos. El impacto de la tormenta se caracterizó por su restricción en área y tiempo. Más del 80% de las denuncias de árboles caídos se concentraron en los CCZ 9, 10, 11 y 13 (Figura 37), mientras que en 8 CCZs no se registró ninguna denuncia. Los valores de velocidad del viento, medidos en Carrasco, son poco significativos debido a lo focalizado del evento y la distancia entre el lugar afectado y la estación meteorológica. No se cuenta con mediciones reales, solo con estimaciones de predicciones meteorológicas.

Figura 37

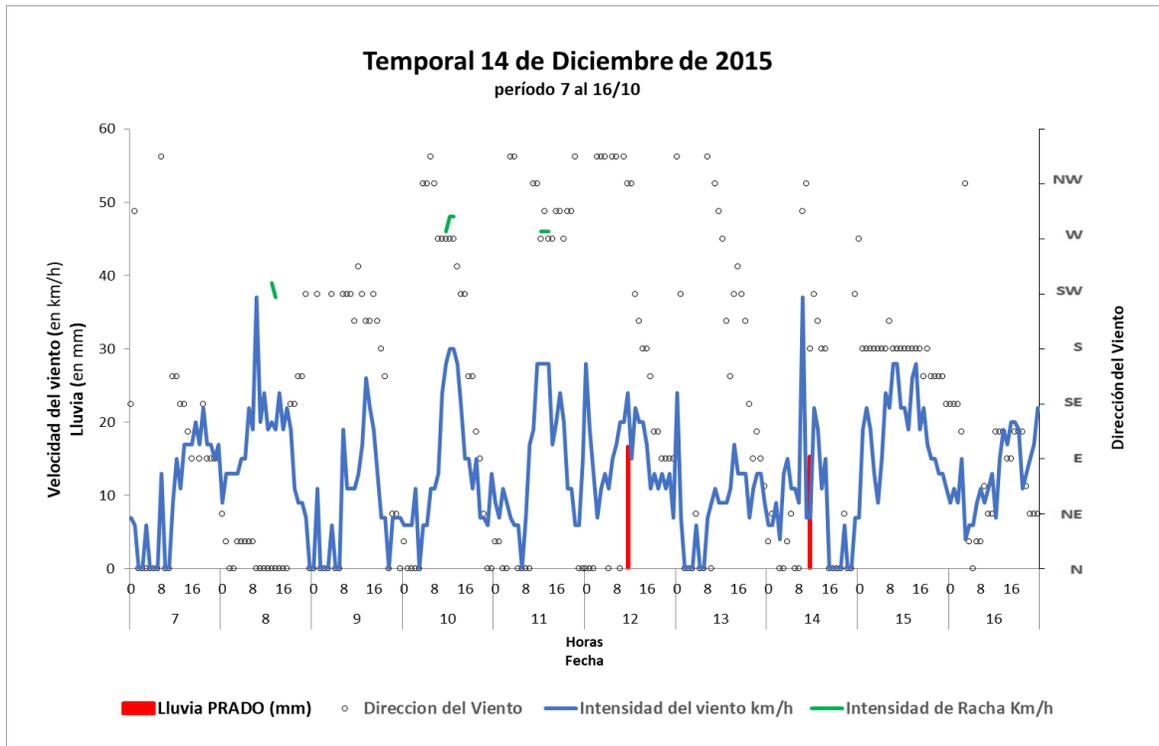
Denuncias de caída de árboles por CCZ - 14/12/2015



Nota. Elaborado con Microsoft Power Pivot para geolocalización de denuncias por CCZ

La Figura 38 muestra los registros de viento en Carrasco y lluvia en Prado. En esas estaciones meteorológicas no se evidencian vientos fuertes ni lluvias copiosas que expliquen el volumen de denuncias. Las características de estas tormentas son justamente lo restringido en su área de incidencia y de duración muy corta (Barreiro et al., 2021).

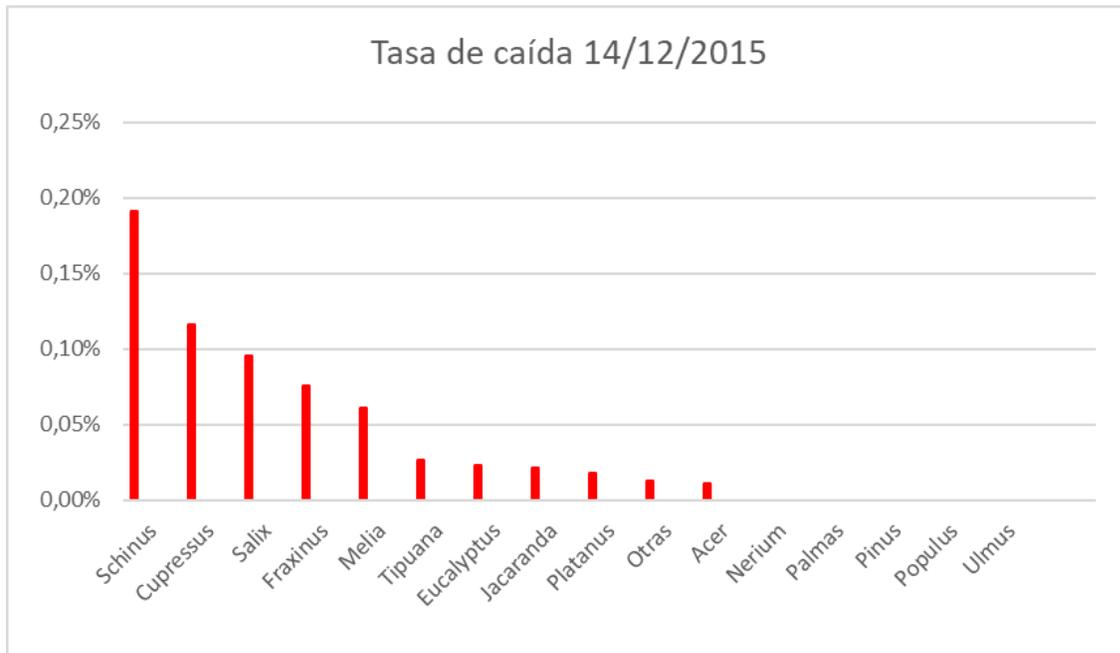
Figura 38
Gráfico del temporal del 14/12/2015



Nota. El eje X representa el tiempo. El eje Y izquierdo muestra velocidad del viento en km/h, y la lluvia en mm, y el eje secundario "Y" derecho indica la dirección del viento por sector. La línea azul indica la velocidad media del viento. La verde indica la velocidad de racha. La barra roja representa la lluvia acumulada en 24 horas, medida a las 9am.

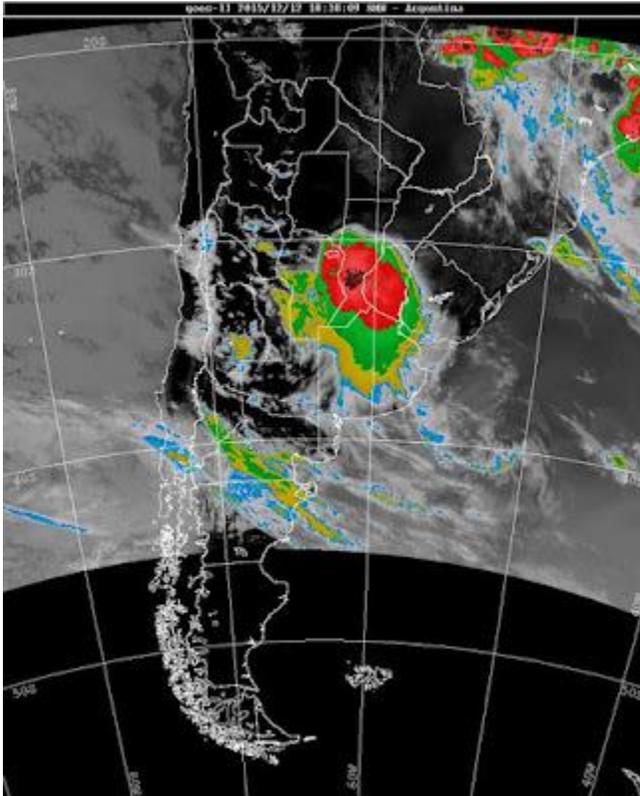
Se observó que los géneros con más individuos afectados durante el evento fueron *Melia*, *Fraxinus* y *Schinus*. Considerando la tasa de caída, *Schinus* fue el más afectado relativamente (Figura 39) localizado básicamente en el CCZ 9, los géneros *Cupressus* y *Salix* también fueron de los más afectados.

Figura 39
Tasa de caída temporal 14/12/2015



A continuación, se destacan algunas noticias publicadas en la web:

La Figura 40, tomada del portal de noticias Meteorología en Uruguay y el mundo (D'Angelo, 2015) presenta una imagen satelital que ilustra los topes nubosos, destacando que las nubes más altas se representan en tonos intensos.

Figura 40*Imagen satelital 14/12/15*

Nota. Tomado de D'Angelo (2015).

“Las tormentas del 12 de diciembre de 2015 dejó voladuras de techo y caída de árboles, cartelería y columnas de electricidad...” (D'Angelo, 2015, párr. 1).

“Bomberos atendió 145 llamados en Montevideo durante la mañana por la tormenta... la zona periférica de Montevideo tuvo el mayor impacto de las consecuencias por la tormenta ocurrida en la mañana del lunes” (Bomberos atendió 145 llamados, 2015, párrs. 1-3).

. . . depresión atmosférica frontal asociada a masa de aire húmedo e inestable afecta al país generando tormentas, algunas puntualmente fuertes. Las mismas estarían acompañadas de los siguientes fenómenos: precipitaciones copiosas (50 - 100 mm), ocasional caída de granizo, intensa actividad eléctrica, rachas de viento muy fuertes (75 - 100 km/h). (Meteorología emitió advertencias, 2015)

El servicio eléctrico en el país está prácticamente restituido luego de haber afectado a 800.000 hogares de Montevideo, Canelones, Rocha y Maldonado. El jerarca confirmó que el problema se dio a raíz de dos fenómenos meteorológicos simultáneos: un rayo caído sobre un cable de alta tensión y

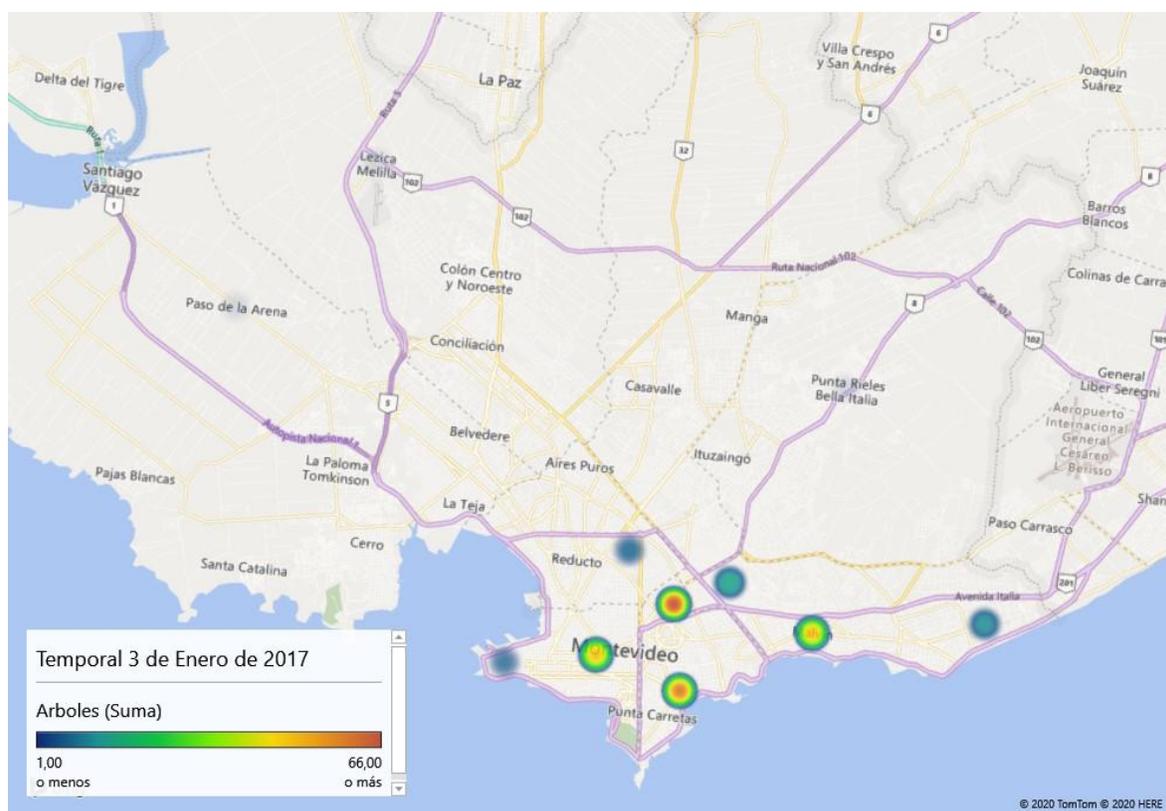
una turbonada en el norte de Montevideo. (UTE sostiene que terminó el apagón, 2015)

4.2.3.2. Temporal del 3 de enero de 2017

Durante esta tormenta, se recibieron un total de 279 denuncias de árboles caídos y 409 ramas. Es interesante destacar que el 80% de estas denuncias se concentró en el Sur de Montevideo, en los CCZ 2, 4, 5 y 7 (Figura 41). Los géneros más afectados fueron *Melia* y *Acer*, tanto en casos como en tasa de caída. En el caso de las ramas, los más denunciados fueron *Melia* (107), *Fraxinus* (58) y *Tipuana* (44).

Figura 41

Denuncias de caída de árboles en temporal del 3/1/2017

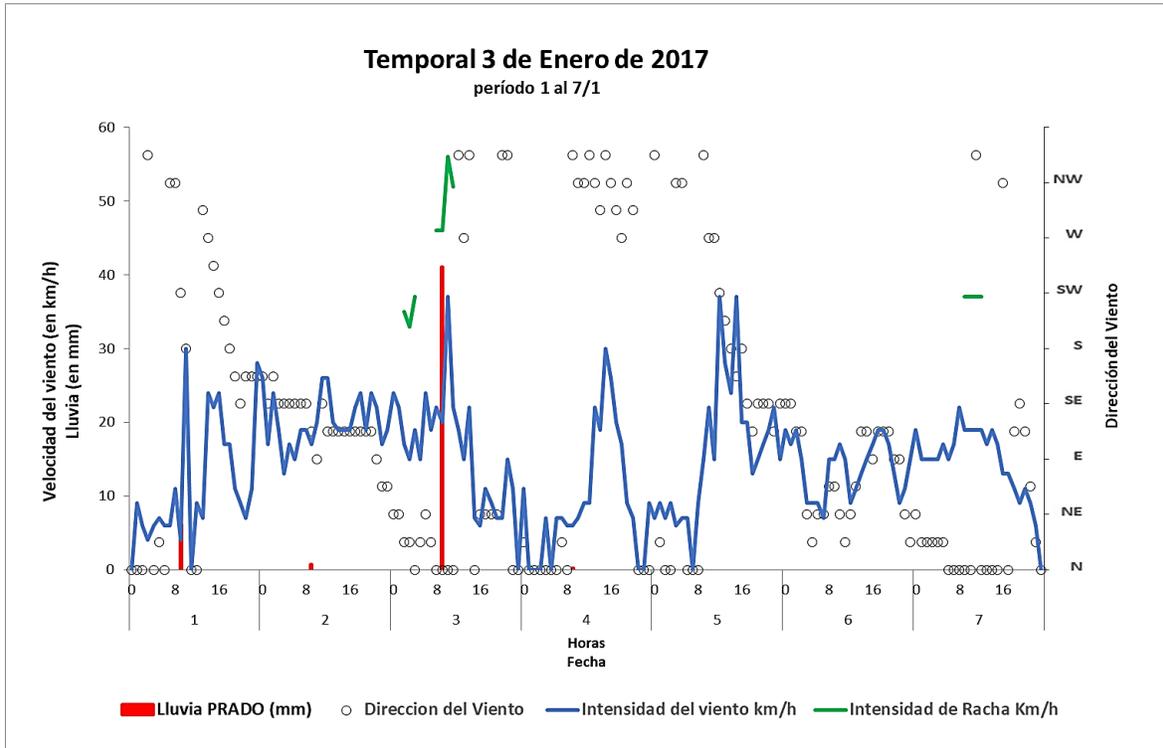


Nota. Elaborado con Microsoft Power Pivot para geolocalización de denuncias por CCZ

La estación meteorológica Carrasco no registró ráfagas de más de 56 km/h (Figura 42 y Figura 43).

En conversación personal con personal técnico de INUMET, el 29 de julio de 2020, comentó que a la hora 12.35 la Estación Prado reportó ráfaga de 76 km/h asociada a tormenta. No fueron vientos sostenidos sino de corta duración y tampoco afectaron a todo el departamento de Montevideo pues en las Estaciones meteorológicas de Melilla y Carrasco los vientos fueron débiles y moderados.

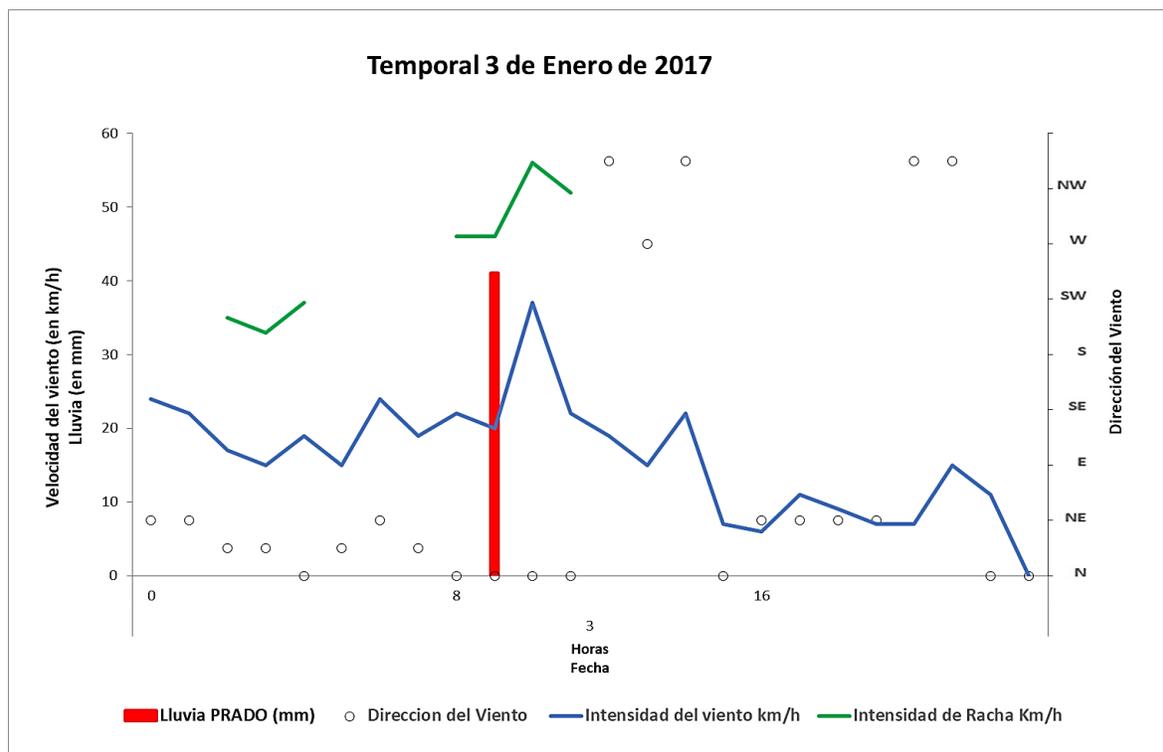
Figura 42
Gráfico del temporal del 3/1/2017



Nota. El eje X representa el tiempo. El eje Y izquierdo muestra velocidad del viento en km/h, y la lluvia en mm, y el eje secundario "Y" derecho indica la dirección del viento por sector. La línea azul indica la velocidad media del viento. La verde indica la velocidad de racha. La barra roja representa la lluvia acumulada en 24 horas, medida a las 9am.

Figura 43

Gráfico del temporal del 3/1/2017. Detalle del evento



En conversación personal con Mónica Acosta, del Departamento de Calidad, Seguridad y Salud ocupacional y Medio Ambiente, de la Terminal Cuenca del Plata, comentó que el operador portuario lleva medición y registro de la velocidad del viento debido a su impacto en los riesgos asociados a la operativa de grúas y cargas suspendidas. Cuando los vientos superan los 72 km/h, se detienen las actividades para garantizar la seguridad. Este protocolo se implementa con el objetivo de prevenir posibles accidentes y proteger tanto el personal como la infraestructura portuaria.

Las lecturas de los anemómetros de la Terminal Cuenca Del Plata, ubicada en el Puerto de Montevideo marcan velocidades máximas de 143,2, 178,4 y 165,8 km/h en tres anemómetros. Estos datos se presentan en la Tabla 11.

Se destaca la intensidad y corta duración del evento. No se cuenta con el dato de dirección del viento.

Tabla 11

Registro de anemómetros en Terminal Cuenca del Plata 3/1/2017

Hora	Anemómetro 1	Anemómetro 2	Anemómetro 3
11:15	46,7	46,6	35,4
11:30	53,1	52,7	46,9
11:45	57,9	46,6	53,1
12:00	37	40,6	32,2
12:15	143,2	178,4	165,8
12:30	103	170,3	
12:45	38,6	48,7	
13:00	12,9	24,3	Dejó de funcionar
13:15	32,2	28,4	
13:30	38,6	46,6	
13:45	46,7	54,7	

Nota. Terminal Cuenca del Plata: “Evaluación de los efectos derivados del evento y de sus consecuencias”, del 3 de enero de 2017, brindados por M. Acosta, (comunicación personal, 27 de julio, 2020).

Figura 44

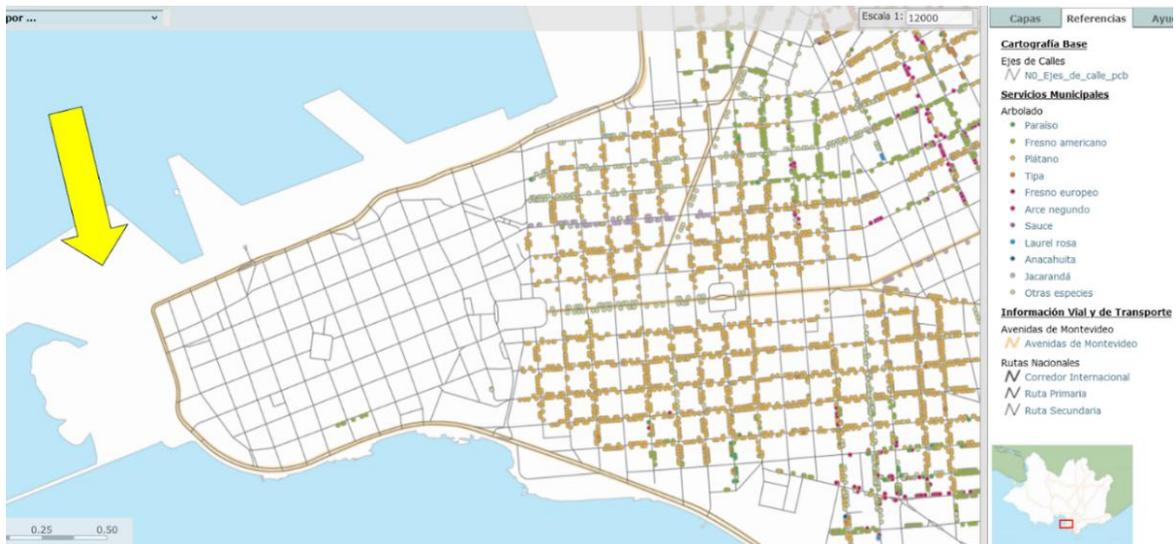
Tasa de caída temporal 3/1/2017



Es importante señalar que el CCZ 1 tiene en inventario 2919 *Platanus x acerifolia* y, sin embargo, se registraron sólo 5 árboles caídos y 40 ramas, con vientos de 143, 168 y 175 km/h registrados en el puerto de Montevideo (Tabla 11).

La Figura 45 brinda información sobre la ubicación de los árboles inventariados en 1998, señalados con círculos, también la ubicación de los anemómetros en la terminal de contenedores (flecha amarilla). Se destaca la ausencia de árboles en la zona oeste del CCZ 1 y la presencia abundante de círculos naranjas que representan árboles de *Platanus x acerifolia*. Dado que los árboles de los CCZ más afectados están al oeste del lugar de medición del viento, hace suponer la gran resistencia de los árboles del CCZ 1.

Figura 45
CCZ 1, Inventario de árboles



Nota. Tomado de Intendencia de Montevideo (2020).

Estos vientos provocaron daños a vehículos, equipos e infraestructura de la terminal (Figura 46).

Figura 46
Registros del temporal de 3/1/2017



Nota. Terminal Cuenca del Plata: “Evaluación de los efectos derivados del evento y de sus consecuencias”, del 3 de enero de 2017, brindados por M. Acosta (comunicación personal, 27 de julio, 2020).

A continuación, se destacan algunas noticias publicadas en la web:

“Un fuerte temporal arremetió en Montevideo este martes al mediodía. Árboles caídos y locales comerciales destrozados en todo el centro y Ciudad Vieja es el saldo de la tormenta” (Galería: Impactantes imágenes, 2017, párr. 1).

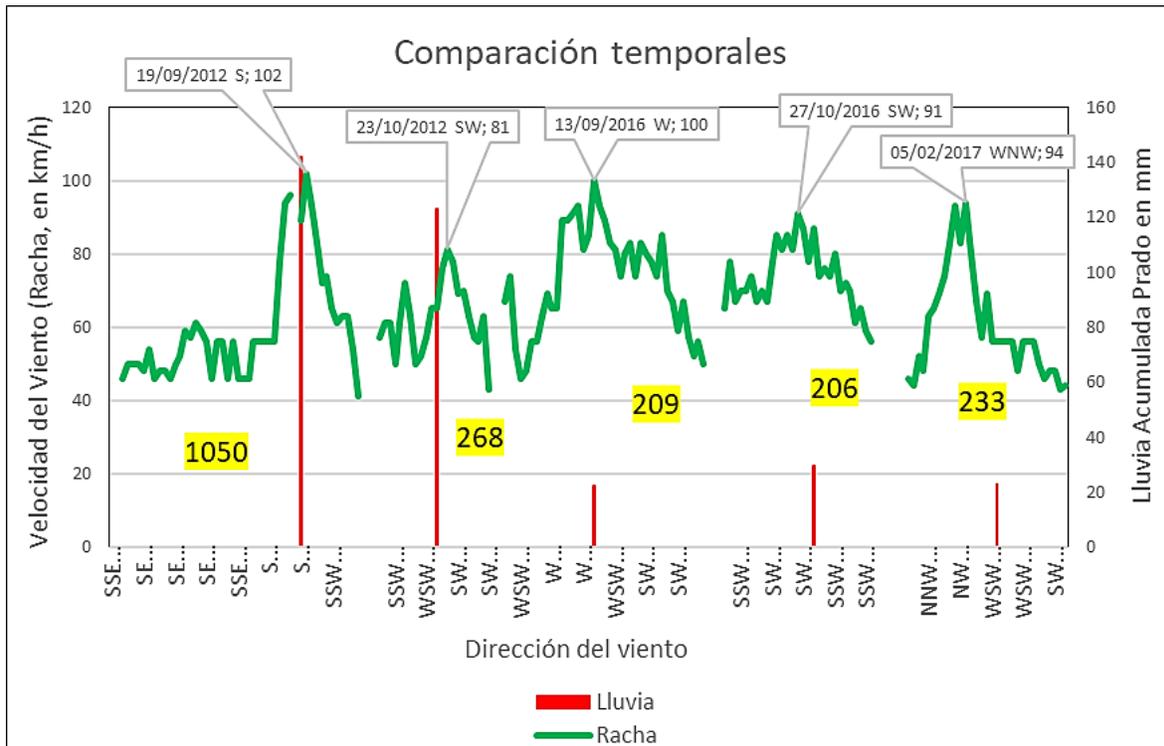
“Son corrientes muy fuertes, que vienen de la vertical, porque son nubes de gran desarrollo vertical, y en ciertas partes las corrientes son más intensas que en otras. Entonces son muy puntuales, son fenómenos muy rápidos y puntuales” (Entrevista central, 2017, párr. 4).

4.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE EVENTOS CLIMÁTICOS

La Figura 47 presenta un gráfico comparativo de los ciclones de mayor impacto, mostrando la duración y evolución de las rachas de viento, con información sobre su velocidad y dirección, junto con la precipitación acumulada en 4 días. Asimismo, se detalla el número de denuncias registradas en cada evento, utilizado como indicador del daño causado.

Las tormentas convectivas quedaron excluidas de este análisis debido a la ausencia de datos precisos que dificulta realizar comparaciones.

Figura 47
Comparación de temporales (ciclones)



Nota. El eje X representa la dirección del viento cada 6 horas. El eje Y izquierdo muestra la velocidad del viento en km/h. El eje Y derecho muestra la lluvia acumulada en mm. La línea verde indica la velocidad de racha. La barra roja representa la lluvia acumulada 4 días. Se señalan con etiquetas la fecha, la dirección y el valor de la racha máxima en km/h, en ese orden. Las etiquetas amarillas indican las denuncias registradas en cada evento.

En la Tabla 12 se comparan características de estos ciclones, analizando eventos ocurridos. Los datos presentan detalles clave como la cantidad de denuncias, la dirección y velocidad máxima de las rachas de viento y la cantidad de lluvia acumulada.

Tabla 12
Características comparadas de ciclones extratropicales

Temporal	Denuncias	Velocidad viento racha (en km/h)	Dirección	Lluvia acumulada en 4 días (en mm)
18/09/2012	1.050	102	S	142
23/10/2012	268	81	SW	123
13/09/2016	209	100	W	22
27/10/2016	206	91	SW	30
05/02/2017	233	94	WNW	23

El 19 de septiembre de 2012 se produjo el evento con mayor cantidad de denuncias registradas en Montevideo, alcanzando un total de 1.050 casos. Este fenómeno se distinguió por rachas de viento provenientes del S, con una velocidad máxima de 102 km/h, y lluvias intensas que acumularon 142 mm. Además, durante este periodo se documentaron seis horas con rachas superiores a 80 km/h.

Un evento, similar en precipitaciones, tuvo lugar el 23 de octubre de 2012, cuando se registró un acumulado de 122 mm de lluvia. Los vientos, provenientes del W, alcanzaron una velocidad de 80 km/h durante una hora y mantuvieron rachas superiores a 70 km/h durante cuatro horas, provocando la caída de 268 árboles. Por otra parte, el temporal del 13 de septiembre de 2016, presentó vientos intensos, con velocidades de hasta 100 km/h desde el oeste, estuvo acompañado de lluvias escasas, acumulando sólo 22 mm. Este evento dejó un saldo de 209 caídas de árboles y se destacó por la persistencia de los vientos, con 21 horas de rachas superiores a 70 km/h y 16 horas con rachas que superaron los 80 km/h.

Al comparar los ciclones, se observa que:

- Los ciclones del 18/9/2012 y del 23/10/2012 tienen precipitaciones similares, aunque este último presentó menor velocidad de viento.
- Los ciclones del 18/9/2012 y 13/9/2016 registraron velocidades de viento comparables (102 km/h vs. 100 km/h), pero precipitaciones significativamente mayores en el primero.
- Los ciclones del 27/10/2016 y 5/2/2017 presentaron velocidades y precipitaciones similares, con impactos similares en el arbolado.

Se observó que las rachas de viento superiores a 80 km/h están significativamente asociadas con la caída de árboles, en concordancia con lo señalado por Peltola (1996). Sin embargo, los eventos de lluvias copiosas, definidos como acumulaciones superiores a 100 mm en un período de cuatro días, registraron más de 40 ocurrencias durante el periodo de estudio, mostrando un efecto limitado en el arbolado cuando no estuvieron acompañados de vientos intensos.

Al analizar ambos fenómenos de manera conjunta, se evidencia que la combinación de rachas de viento intensas y precipitaciones incrementa significativamente la probabilidad de caídas de árboles. Este hallazgo coincide con estudios previos, como los de Duryea y Kampf (2007), quienes concluyen que la probabilidad de caída aumenta con la velocidad del viento, especialmente cuando está asociada a lluvias, y con las observaciones de Usbeck et al. (2010), que destacan cómo estas condiciones climáticas actúan de manera sinérgica para debilitar la estabilidad del arbolado.

Los resultados de este estudio en Montevideo refuerzan la importancia de considerar las condiciones locales en la gestión del arbolado, resaltando la necesidad de implementar estrategias de manejo que tomen en cuenta las condiciones climáticas extremas. Sin embargo, para realizar afirmaciones categóricas sobre esta relación, es fundamental contar con datos de mayor calidad y detalle que permitan un análisis más preciso de los factores que influyen en la estabilidad del arbolado urbano.

En este contexto, resulta fundamental que los registros de denuncias incluyan la identificación del individuo presente en el censo 2008 (Áreas Verdes & Espacios Públicos y Edificaciones, 2008), al analizar las causas de la caída, pues se deben considerar factores como la especie, la historia de manejo, las características del sitio, la edad, las dimensiones del árbol, así como las posibles interferencias aéreas o subterráneas. Existen experiencias como la de la Western Tree Failure Database (WTFD) (University of California, s.f.), y la Base de Datos Española de Colapsos de Árboles (BDECA) (Asociación Española De Parques y Jardines Públicos, s.f.), que recopilan información sobre fallas mecánicas en árboles urbanos y desarrollan perfiles de colapso para diversas especies. Esto permite evaluar de manera más precisa la probabilidad de fallas en árboles vivos, con el fin de disminuir el riesgo de fallas en los espacios urbanos arbolados.

Es esencial implementar planes de acciones correctivas, como podas, extracciones y nuevas plantaciones, dirigidos a la mitigación y preparación ante eventos climáticos adversos en cada zona específica (Escalante & Colunga, 2003; Grau & Kortsarz, 2012; Read, 2000; Salbitano et al., 2016; Terrani Texeira, 2014).

Es necesario mejorar la precisión en la recolección de datos sobre tormentas convectivas. Estos registros, junto con su evolución ante los desvíos ocasionados por el cambio climático, podrían ayudar a establecer especies objetivo y no recomendadas, evaluándose según el riesgo de falla por sitio y considerando factores como topografía, urbanización, suelos y exposición.

4.4. RECOMENDACIONES

Priorizar especies resilientes: Fomentar la plantación de árboles como *Fraxinus*, *Melia*, *Platanus* y *Tipuana*, que han demostrado resistencia a eventos climáticos adversos, a pesar de que algunas puedan presentar características no deseables (sanidad, alérgenos, invasividad, rotura de veredas). No deben descartarse especies exitosas, con buena adaptación y longevidad, que por falta de identificación no pudieron ser evaluadas en este estudio.

Evitar especies vulnerables: Evitar la plantación de *Cupressus*, *Eucalyptus*, *Pinus*, *Schinus* y *Salix*, que además de sus características no deseadas como excesivo tamaño de copa, follaje persistente, desarrollo agresivo con las infraestructuras, tienen altas tasas de caída durante tormentas.

Programa de monitoreo y mantenimiento: Implementar un sistema de inspecciones regulares sobre el estado estructural de los árboles, especialmente en áreas de alto riesgo, y desarrollar un plan de podas preventivas para eliminar ramas muertas o débiles.

Análisis de causas de caídas: Realizar relevamientos para investigar las causas de caídas, identificando factores que contribuyen a la debilidad estructural.

Integración del arbolado en el diseño urbano: Asegurar que los espacios para el crecimiento de los árboles sean adecuados, teniendo en cuenta el tamaño de las raíces y el espacio aéreo necesario, así como evaluar el impacto de la infraestructura en la salud de los árboles.

Campañas de sensibilización: Implementar iniciativas que informen sobre la importancia del arbolado urbano y el manejo adecuado, promoviendo la participación ciudadana en su cuidado.

Capacitación del personal: Proporcionar formación a los profesionales de arboricultura sobre las mejores prácticas de manejo y evaluación del arbolado, considerando el impacto del cambio climático.

Colaboración interinstitucional: Fomentar la colaboración entre el gobierno local, entes estatales, ONGs y comunidades para desarrollar planes de infraestructura y políticas integrales de manejo del arbolado urbano.

Registro de datos actualizado: Mantener una base de datos completa sobre el arbolado urbano que incluya información sobre especies, estado sanitario y antecedentes de intervenciones, facilitando así el análisis y la toma de decisiones.

Investigaciones adicionales: Realizar estudios que profundicen en el comportamiento de las especies y su adaptación a condiciones climáticas cambiantes.

Cabe aclarar que estas recomendaciones son de carácter general. La Intendencia de Montevideo ya implementa estas sugerencias.

5. CONCLUSIONES

El estudio detallado de la caída de árboles en Montevideo se enmarca en la necesidad de comprender y abordar los impactos de las tormentas en el arbolado urbano. Con más de 200.000 árboles en sus aceras, la ciudad enfrenta desafíos constantes para mantener la seguridad y la calidad de vida de sus habitantes frente a eventos climáticos adversos.

Los hallazgos específicos, como la identificación de géneros vulnerables y resistentes, la correlación con temporalidad y la variabilidad en distintas zonas de la ciudad, proporcionan información crucial para la gestión municipal y la planificación urbana. La selección cuidadosa de árboles por parte de la Intendencia y la diferenciación en la probabilidad de caídas entre los diferentes Centros Comunales Zonales ofrecen pautas para mejorar la resiliencia del arbolado urbano y reducir los riesgos asociados a las caídas de árboles.

El análisis detallado reveló varios hallazgos significativos:

Los géneros *Cupressus*, *Pinus*, *Eucalyptus* y *Schinus* son particularmente susceptibles a vientos fuertes en conjunción con lluvias intensas, mientras que *Salix* presenta una menor vulnerabilidad en comparación. En contraste, los géneros *Jacaranda*, *Fraxinus*, *Melia*, *Platanus*, *Tipuana* y *Acer* se consideran resistentes a los temporales según los resultados del estudio.

Se destaca una fuerte relación entre las caídas de árboles y los temporales con ráfagas de viento intensas, acompañados de lluvias copiosas, resaltando la importancia de esta asociación en la incidencia de tales eventos.

Se ha encontrado una marcada estacionalidad en las caídas de árboles, sugiriendo períodos específicos del año con mayor probabilidad de tales eventos. Esta información es fundamental para la planificación y prevención efectiva en la gestión del arbolado urbano.

Los Centros Comunales Zonales (CCZ) 4, 11, 17 y 18 exhiben una mayor probabilidad de caídas de árboles, mientras que los CCZ 6, 1, 14 y 8 muestran tasas más bajas, teniendo en cuenta que el CCZ 8 y el CCZ 14 son que cuentan con la mayor cantidad de árboles

Las características de los vientos extremos que afectan a Uruguay, destacan las influencias de ciclones extratropicales y tormentas convectivas severas como los principales fenómenos meteorológicos que generan los vientos más intensos.

Los vientos estudiados superaron los 90 km/h, donde las ráfagas más fuertes tienden a provenir del S, SW y WNW. Es necesario acotar que las condiciones locales pueden modificar la intensidad y dirección del viento.

Cabe recordar que las tormentas convectivas severas son intensas y transitorias, pueden alcanzar velocidades considerables (178 km/h registrados en TCP, Puerto de Montevideo), tener variaciones durante su desplazamiento y generando corrientes descendentes que divergen radialmente al impactar el suelo, lo que provoca vientos intensos que se expanden en todas las direcciones durante breves periodos de tiempo. Cuando estas condiciones de viento se asocian con lluvias es cuando se producen los mayores impactos sobre los árboles.

Estas afirmaciones deben ser relativizadas debido a ciertos grados de incertidumbre y limitaciones metodológicas. En la evaluación de los datos meteorológicos, como la velocidad del viento o la intensidad de las lluvias, puede ser relativa debido a la necesidad de utilizar datos de fuera del departamento, lo que puede afectar la precisión de los resultados. Especialmente en el caso de tormentas convectivas, la falta de información relevante limita la completa comprensión de su intensidad y efectos. Esto introduce variabilidad en los resultados, ya que las condiciones ambientales en áreas cercanas no necesariamente reflejan las condiciones exactas en el lugar de incidencia.

En cuanto a la identificación de especies y géneros de árboles, se observa una falta de precisión, y en algunos casos errores en la determinación de géneros, lo que genera incertidumbre en los análisis sobre la tasa de caída y la resistencia de ciertas especies. Esto puede influir en la validez de las conclusiones, al igual que el uso de muestras pequeñas y datos no representativos que restringen la generalización de los resultados.

Un bosque urbano saludable, con una composición diversa, de árboles jóvenes y maduros, con una buena cobertura, puede brindar importantes beneficios para mitigar los efectos de los vientos fuertes.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alertan por un “cyclón extra tropical intenso” en Uruguay para el martes. (2012, 22 de octubre). *LaRed21*. <https://www.lr21.com.uy/comunidad/1068614-alertan-por-un-ciclon-extra-tropical-intenso-en-uruguay-para-el-martes>
- Alvarado, A., Baldini, A., & Guajardo, F. (2012). *Árboles urbanos de Chile: Guía de reconocimiento*. CONAF.
- Áreas Verdes, & Espacios Públicos y Edificaciones. (2008). *Censo de arbolado 2008: Catálogo de Datos Abiertos* [Conjunto de datos]. IM. <https://catalogodatos.gub.uy/dataset/censo-de-arbolado-2008>
- Asociación Española de Parques y Jardines Públicos. (s.f.). *Base de Datos Española de Colapso de Árboles*. <https://www.aepjp.es/bdeca/>
- Barreiro, M., Arizmendi, F., Díaz, N., & Trinchin, R. (2021). *Análisis de la variabilidad y tendencias observadas de los vientos en Uruguay*. Universidad de la República.
- Barthélémy, D., & Caraglio, Y. (2007). Plant architecture: A dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. *Annals of Botany*, 99(3), 375-407. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl260>
- Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2006). *Green infrastructure: Linking landscapes and communities*. The Conservation Fund.
- Benito, G., & Palermo Arce, M. (2022). *El árbol en la ciudad: Manual de arboricultura Urbana*. Editorial Facultad de Agronomía.
- Bomberos atendió 145 llamados en Montevideo durante la mañana por la tormenta. (2015, 14 de diciembre). *Teledoce*. <https://www.teledoce.com/telemundo/policiales/bomberos-atendio-145-llamados-en-montevideo-durante-la-manana-por-la-tormenta/>
- Bonilla, J. (2018, 1 de noviembre). *Modelación de tormentas convectivas mediante software específico* [Contribución]. 4^{to} Encuentro de investigadores en formación en recursos hídricos IFRH 2018, Ezeiza, Buenos Aires. https://www.ina.gov.ar/ifrh-2018/pdf/IFRH_2018_paper_52.pdf
- Bozzo, A. (2021). *Consultoría para apoyo al desarrollo e implementación de planes de arbolado urbano y áreas verdes departamentales considerando la capacidad de producción de viveros, para la adaptación al cambio climático y la variabilidad*. MVOT; NAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/Planes%20de%20arbolado%20urbano%20y%20producci%C3%B3n%20de%20viveros.pdf>

- Bustamante, C., Jans, M., & Higuera García, E. (2014). El comportamiento del viento en la morfología urbana y su incidencia en el uso estancial del espacio público, Punta Arenas, Chile. *Revista AUS*, (15), 28-33. <https://doi.org/10.4206/aus.2014.n15-06>
- Bustos, C. E. (2010). *Diagnóstico del arbolado urbano de la Av. Libertador Bernardo O'Higgins de la ciudad de Talca* [Trabajo final de grado]. Universidad de Talca.
- Calaza Martínez, P., & Iglesias Díaz, M. (2016). *El riesgo del arbolado urbano: Contexto, concepto y evaluación*. Mundi-Prensa.
- Clark, J. R., & Matheny, N. (2010). The research foundation to tree pruning: A review of the literature. *Arboriculture & Urban Forestry*, 36(3), 110-120. <https://doi.org/10.48044/jauf.2010.015>
- Colán de la Vega, X. del P., Cipra Rodríguez, J. A., Montoya Yanavilca, A. E., Adriano Reyes, J. J., & Móstiga Rodríguez, M. J. (2019). ¿Existe riesgo de caída de árboles de *Schinus molle* por la presencia de tumores en la ciudad de Lima? *Espacio y Desarrollo*, (34), 175-200. <https://doi.org/10.18800/espacioydesarrollo.201902.008>
- Comerci, R. E. (2010). *Catálogo de plagas y enfermedades del arbolado urbano: Descripción, control y tratamiento*. Orientación Gráfica.
- Corso, P. (2024, 1 de abril). *Caída de árboles urbanos, un problema ambiental prioritario*. SciDev.Net. <https://www.scidev.net/americas-latina/news/caida-de-arboles-urbanos-un-problema-ambiental-prioritario/>
- D'Angelo, J. (2015, 14 de diciembre). (13/12/15) – *Severa tormenta golpeo el litoral y norte de Uruguay con daños importantes*. BCP Salto. http://bcpsalto.blogspot.com/2015/12/131215-severa-tormenta-golpeo-el_14.html
- Day, S., Wiseman, P. E., Dickinson, S., & Harris, J. R. (2010). Contemporary concepts of root system architecture of urban trees. *Arboriculture & Urban Forestry*, 36(4), 149-159. <https://doi.org/10.48044/jauf.2010.020>
- Dirección General de Servicios Agrícolas. (2024). *Información actualizada sobre el picudo rojo de las palmeras a setiembre 2024*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/noticias/informacion-actualizada-sobre-picudo-rojo-palmeras-setiembre-2024>
- Dunster, J. A., Smiley, E. T., Matheny, N., & Lilly, S. (2017). *Tree risk assessment manual* (2nd ed.). International Society of Arboriculture.

- Durañona, V. (2012, 15 de junio). *Clima de vientos extremos de Uruguay y su efecto en la selección y operación de aerogeneradores* [Contribución]. III Jornadas de Energía Eólica 2012, Montevideo.
<https://mvdpanel.net/adjuntosTextos/cz47hroew7iqkp/687/Duranona.pdf>
- Durañona, V. (2015). *Extreme wind climate of Uruguay* [Disertación doctoral, Universidad de la República]. Colibri.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/8394>
- Duryea, M. L., & Kampf, E. (2007). Wind and trees: Lesson learned from hurricanes. *EDIS*, 2007(20), 1-17.
<https://journals.flvc.org/edis/article/view/116998>
- Duryea, M. L., Kampf, E., & Littell, R. C. (2007). Hurricanes and the Urban Forest: I. Effects on Southeastern United States coastal plain tree species. *Arboriculture & Urban Forestry*, 33(2), 83-96.
- Entrevista central, miércoles 4 de enero: Madeleine Renom. (2017, 4 de enero). *En Perspectiva*. <https://enperspectiva.uy/enperspectiva-net/entrevista-central-miercoles-4-de-enero-madeleine-renom/>
- Escalante, S., & Colunga, P. (2003). Huracanes, arboricultura y ordenanzas municipales. *Revista de La Universidad Autónoma de Yucatán*, (224), 10-21. <https://www.revistauniversitaria.uady.mx/pdf/224/ru2243.pdf>
- Gale. (2016, 27 de octubre). *Extraordinario ciclón extratropical frente a costas de Uruguay, 27 octubre 2016*. [Publicación en un foro en línea].
<https://cazatormentas.com/foro/temas-de-meteorologia-en-general/extraordinario-ciclon-extratropical-frente-a-costas-de-uruguay-27-octubre-2016/>
- Galería: Impactantes imágenes del temporal en Montevideo. (2017, 3 de enero). *LaRed21*. <https://www.lr21.com.uy/comunidad/1317830-plaza-independencia-vientos-temporal-3-enero-2017>
- García, N., & Ormazabal, C. (2008). *Árboles nativos de Chile*. Enersis.
- Gardiner, B., Berry, P., & Moulia, B. (2016). Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. *Plant Science*, 245, 94-118.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.01.006>
- Göcke, L., Rust, S., & Ruhl, F. (2018). Assessing the anchorage and critical wind speed of urban trees using root-plate inclination in high winds. *Arboriculture & Urban Forestry*, 44(1), 1-11. <https://doi.org/10.48044/jauf.2018.001>
- Google. (s.f.a). *Google Earth* [Aplicación web]. Recuperado el 10 de mayo de 2020, de <https://www.google.com/earth/>

- Google. (s.f.b). *Google Maps* [Aplicación web]. Recuperado el 10 de mayo de 2020, de <https://www.google.com/maps/>
- Grau, A., & Kortsarz, A. M. (Eds.). (2012). *Guía de arbolado de Tucumán* (2^{da} ed.). Universidad Nacional de Tucumán.
- Harris, R. W., Clark, J. R., & Matheny, N. P. (2003). *Arboriculture: Integrated management of landscape trees, shrubs, and vines* (4th ed.). Pearson College Div.
- Imagen satelital muestra el enorme ciclón en el Atlántico. (2016, 13 de septiembre). *Carmelo Portal*. <https://www.carmeloportal.com/12858-imagen-satelital-muestra-el-enorme-ciclon-en-el-atlantico>
- Instituto Nacional de Estadística. (2023). *Anuario estadístico nacional 2023*. <https://www.gub.uy/instituto-nacional-estadistica/book/1744/download>
- Instituto Uruguayo de Meteorología. (2017). *Informe especial: Ciclón extratropical ocurrido entre el 5 y 6 de febrero de 2017*. <https://es.scribd.com/document/338600702/Informe>
- Intendencia de Montevideo. (2020). [Sistema de Información Geográfica. Mapa]. Recuperado el 5 de julio de 2021, de <https://intgis.montevideo.gub.uy/pmapper/map.phtml?&config=default&me=548000,6130000,596000,6162000>
- Jaffe, M. J. (1973). Thigmomorphogenesis: The response of plant growth and development to mechanical stimulation. *Planta*, 114(2), 143-157. <https://doi.org/10.1007/BF00387472>
- Koeser, A. K., Klein, R. W., Hauer, R. J., Miesbauer, J. W., Freeman, Z., Harchick, C., & Kane, B. (2023). Defective or just different? Observed storm failure in four urban tree growth patterns. *Forests*, 14(5), Artículo e988. <https://doi.org/10.3390/f14050988>
- Kokoreva, I. I. (1996). Root systems of *Crataegus* L. in the Trans-Ili Alatau, Kazakhstan. En H. Persson & I. O. Baitulin (Eds.), *Plant root systems and natural vegetation* (pp. 35-38). Svenska Växtgeografiska Sällskapet. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:565554/FULLTEXT01.pdf>
- Kramer, P. J., & Boyer, J. S. (1995). *Water relations of plants and soils*. Academic Press. <https://udspace.udel.edu/items/b5f074c7-7dd0-4d04-842d-e0be61e01bf7>
- Langer, M., Hegge, E., Speck, T., & Speck, O. (2022). Acclimation to wind loads and/or contact stimuli? A biomechanical study of peltate leaves of *Pilea peperomioides*. *Journal of Experimental Botany*, 73(4), 1236-1252. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab541>

- Las Tormentas: Relámpagos, vientos y lluvias. (2013, 15 de julio). *Biblioteca de Investigaciones*.
<https://bibliotecadeinvestigaciones.wordpress.com/ciencias-de-la-tierra/las-tormentas/>
- Lluvias y pasos cortados: Temporal de viento en el sur y este: Tornado en Rocha. (2012, 23 de octubre). *Met Uruguay*.
<http://meteorologiauruguay.blogspot.com/2012/10/furioso-temporal-de-viento-azota-el-sur.html>
- Loewe Muñoz, V., Delard, C., & Subiri Poblete, M. (1997). *Fresno: Fraxinus excelsior: Monografía*. INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/3992>
- Lo que el viento nos dejó. (2017, 6 de febrero). *Colón Portal*.
<https://www.colon.com.uy/actualidad-y-noticias/1520-lo-que-el-viento-nos-dej%C3%B3>
- Lombardo, A. (1979). *Los árboles cultivados en los paseos públicos* (2ª ed.). IMM.
- Lyytimäki, J. (2017). Disservices of urban trees. En F. Ferrini, C. C. Konijnendijk van den Bosch, & A. Fini (Eds.), *Routledge handbook of urban forestry* (pp. 164-176). Routledge.
- Marchesi, E., Alonso, E., Brussa, C., Delfino, L., García, M. & Haretche, F. (2013). Plantas vasculares. En A. Soutullo, C. Clavijo & J. A. Martínez-Lanfranco (Eds.), *Especies prioritarias para la conservación en Uruguay: Vertebrados, moluscos continentales y plantas vasculares* (pp. 27-72). MVOTMA; SNAP; MEC.
- Matheny, N. P., & Clark, J. R. (1998). *Trees and development: A Technical guide to preservation of trees during land development*. International Society of Arboriculture.
- Mattheck, C. & Breloer, H. (1994). *The body language of trees: A handbook for failure analysis*. HMSO.
- McPherson, G., Simpson, J. R., Peper, P. J., Maco, S. E., & Xiao, Q. (2005). Municipal forest benefits and costs in five US cities. *Journal of Forestry*, 103(8), 411-416. <https://doi.org/10.1093/jof/103.8.411>
- Meteorología emitió advertencias naranja y amarilla. (2015, 14 de diciembre). *Montevideo Portal*. <https://www.montevideo.com.uy/Noticias/Meteorologia-emitio-advertencias-naranja-y-amarilla-uc293630>
- Moniz, F. (1979). Las enfermedades del olmo. *Boletín de sanidad vegetal. Plagas*, 5(1), 79-84.

- Moore, G. M. (2014). Wind-thrown trees: Storms or management? *Arboriculture & Urban Forestry*, 40(2), 53-69.
- Mula, J. A. (s.f.). *Cultivo y características de cinamomo (Melia azedarach)*. Agromática. <https://www.agromatica.es/cinamomo/>
- Nowak, D., Dwyer, J., & Childs, G. (1998). Los beneficios y costos del enverdecimiento urbano. En L. Krishnamurthy & J. R. Nascimento (Eds.), *Areas Verdes Urbanas en Latinoamerica y el Caribe* (pp. 17-38). Universidad Politécnica de Texcoco
- Peltola, H. (1996). Model computations on wind flow and turning moment by wind for Scots pines along the margins of clear-cut areas. *Forest Ecology and Management*, 83(3), 203-215. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(96\)03717-6](https://doi.org/10.1016/0378-1127(96)03717-6)
- Peltola, H. (2006). Mechanical stability of trees under static loads. *American Journal of Botany*, 93(10), 1501-1511. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1501>
- Pérez Caicedo, J. & Lozano Osorio, D. (2015). *Efecto de la sombra de los árboles en la durabilidad por efectos de la radiación UVB de una mezcla tipo MSC-2 en la ciudad de Cartagena* [Tesis de maestría]. Pontificia Universidad Javeriana.
- Pérez Campaña, R., & Talavera García, R. (2008, enero). "Verde Urbano" y calidad ambiental: Claves para una intervención más sostenible en el espacio urbano [Contribución]. 9º Congreso Nacional del Medio Ambiente, Madrid. https://www.researchgate.net/publication/259012912_VERDE_URBANO_Y_CALIDAD_AMBIENTAL
- Pokorny, J., O'Brien, J., Hauer, R., Johnson, G., Albers, J., Bedker, P., & Mielke, M. (2003). *Urban tree risk management: A community guide to program design and implementation*. USDA Forest Service.
- Priego González de Canales, C. (2002). *Beneficios del Arbolado Urbano*. CSIC. <http://hdl.handle.net/10261/24578>
- Quine, C. P. (2000). Estimation of mean wind climate and probability of strong winds for wind risk assessment. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 73(3), 247-258. <https://doi.org/10.1093/forestry/73.3.247>
- Read, H. (2000). *Veteran trees: A guide to good management*. English Nature.
- Real Academia Española. (s.f.a). Riesgo. En *Diccionario de la lengua española* (23ra ed.). <https://dle.rae.es/riesgo>

- Real Academia Española. (s.f.b). Peligro. En *Diccionario de la lengua española* (23ra ed.). <https://dle.rae.es/peligro>
- Recagno, V. (2024, febrero). *Natural alero: Análisis de arbolado de Montevideo*. RPubS. https://rpubs.com/virginia_recagno/arbolado_Montevideo
- Richards, N. A. (1983). Diversity and stability in a street tree population. *Urban Ecology*, 7(2), 159-171. [https://doi.org/10.1016/0304-4009\(83\)90034-7](https://doi.org/10.1016/0304-4009(83)90034-7)
- Rizzardi, S., & Calvo, G. (2018). Sistema radicular de los árboles en ámbitos urbanos. *Terra Mundus*, 5(1), 1-23. <https://publicacionescientificas.uces.edu.ar/index.php/terramundus/article/view/552>
- Salbitano, F., Borelli, S., Conigliaro, M., & Chen, Y. (2016). *Directrices para la silvicultura urbana y periurbana*. FAO.
- Secuelas de un temporal anunciado. (2016, 28 de octubre). *El País*. <https://www.elpais.com.uy/informacion/secuelas-de-un-temporal-anunciado>
- Sentencia No. 296: [L. L., D. y otros c/ Intendencia Municipal de Montevideo - daños y perjuicios - casación]. (2015, 4 de noviembre). Poder Judicial. https://www.poderjudicial.gub.uy/images/resoluciones/2015/sent_sci_04-11-16_casacion_arbol_medica_perjuicios.pdf
- Shackleton, C. M., Ruwanza, S., Sinasson Sanni, G. K., Bennett, S., De Lacy, P., Modipa, R., Mtati, N., Sachikonye, M., & Thondhlana, G. (2016). Unpacking Pandora's box: Understanding and categorising ecosystem disservices for environmental management and human wellbeing. *Ecosystems*, 19(4), 587-600. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9952-z>
- Sinnett, D., Morgan, G., Williams, M., & Hutchings, T. (2008). Soil penetration resistance and tree root development. *Soil Use and Management*, 24(3), 273-280. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00164.x>
- Temporal: 65 mil hogares quedaron sin luz. (2017, 6 de febrero). *LaRed21*. <https://www.lr21.com.uy/comunidad/1321396-inumet-estado-del-tiempo-montevideo-departamentos>
- Terrani Texeira, E. (2014). *Evaluación de la estructura y comportamiento del arbolado urbano en Montevideo* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Tres muertos por el temporal. (2012, 19 de septiembre). *El Observador*. <https://www.elobservador.com.uy/nota/tres-muertos-por-el-temporal-201291922320>

- Un fuerte temporal deja dos muertos en Uruguay y seis en Paraguay y Argentina. (2012, 20 de septiembre). *El País*.
https://elpais.com/internacional/2012/09/20/actualidad/1348108857_374543.html
- Un muerto, destrozos y miles de usuarios sin luz por el temporal de viento. (2016, 14 de septiembre). *El Observador*.
<https://www.elobservador.com.uy/nota/un-muerto-destrozos-y-miles-de-usuarios-sin-luz-por-el-temporal-de-viento-2016914500>
- University of California. (s.f.). *Western Tree Failure Database/California Tree Failure Report Program*. <https://ucanr.edu/sites/treefail>
- Unos 38 mil usuarios de Ute sin energía eléctrica. (2016, 27 de octubre). *Radio Montecarlo CX20-930 AM*.
<https://www.radiomontecarlo.com.uy/2016/10/27/nacionales/unos-38-mil-usuarios-de-ute-sin-energia-electrica/>
- Uruguay XXI. (2023, 29 de diciembre). *Montevideo, la mejor ciudad para vivir*.
<https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/noticias/articulo/montevideo-la-mejor-ciudad-para-vivir/>
- Usbeck, T., Wohlgemuth, T., Dobbertin, M., Pfister, C., Bürgi, A., & Rebetz, M. (2010). Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(1), 47-55.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.08.010>
- UTE sostiene que terminó el apagón que afectó a más de 800.000 clientes. (2015, 14 de diciembre). *Subrayado*. <https://www.subrayado.com.uy/ute-sostiene-que-termino-el-apagon-que-afecto-mas-800000-clientes-n51423>
- Valla, J., Jankowski, L., Bazzano, D., & Hernández, A. (1999). *Árboles urbanos: Los árboles cultivados más comunes de la Región Rioplatense (Delta del Paraná, Isla Martín García y Ribera Platense)*. LOLA.
- Vargas, G. (2017). Estrategias mecánicas de las plantas arborescentes: Enseñanzas estructurales de los árboles. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 25(3), 510-523. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052017000300510>
- Vargas-Silva, G. (2019). Biomecánica de los árboles: crecimiento, anatomía y morfología. *Madera Y Bosques*, 25(3).
<https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531712>
- Vogt, J., Hauer, R., & Fischer, B. (2015). The costs of maintaining and not maintaining the urban forest: A review of the urban forestry and arboriculture literature. *Arboriculture & Urban Forestry*, 41(6), 293-323.