



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

Tesis de Grado en Geofísica

**Caracterización de la Actividad Eléctrica
Atmosférica en la zona central de Argentina
por medio de las variaciones en la tasa de
descargas eléctricas atmosféricas.**

Constanza Inés Villagrán Asiares

Dirección:

M. Gabriela Nicora

Co-Dirección:

Javier Vasquez, Juan Lucas Bali



FACULTAD DE CIENCIAS ASTRONÓMICAS Y GEOFÍSICAS

La Plata, Argentina

Año 2019

CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD ELÉCTRICA
ATMOSFÉRICA EN LA ZONA CENTRAL DE ARGENTINA POR
MEDIO DE LAS VARIACIONES EN LA TASA DE DESCARGAS
ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS.

Tesis presentada en cumplimiento de los requisitos para obtener el

grado de

Geofísica

en la

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Universidad Nacional de La Plata

por Villagrán Asiares, Constanza Inés.

Directora: Dra. M.Gabriela Nicora (Facultad de Cs. Astronómicas y Geofísicas, UNLP)

Co-Director: Javier Vasquez (Facultad de Cs. Astronómicas y Geofísicas, UNLP)

Juan Lucas Bali.

Jurado: (Facultad de Cs. Astronómicas y Geofísicas, UNLP)

(Facultad de Cs. Astronómicas y Geofísicas, UNLP)

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Universidad Nacional de La Plata

Paseo del Bosque s/n

(1900) La Plata

Argentina

Agradecimientos

Deseo agradecer a toda la gente que estuvo conmigo en esta etapa, en especial a mi familia, a mis papás que gracias a ellos hoy soy lo que soy, hoy estoy en donde estoy con muchos sueños, y cumpliendo uno de ellos. Ellos nunca cortaron mis alas, y siempre me alentaron, me dieron las herramientas para luchar por lo que desee. Desde el principio, sin conocer nada sobre la carrera y en que me estaba metiendo ellos me apoyaron y confiaron en mí, me acompañaron desde Salta, pero siempre presentes en todas las etapas de mi vida. Gracias papás por confiar en mí, por enseñarme valores tan importantes en la vida como la humildad, la solidaridad y el compañerismo. Quiero agradecer a mis hermanos, que como toda relación de hermanos uno tiene sus peleas y sus buenos momentos. Gracias por quererme, por dejarse querer, por estar siempre conmigo, por crecer juntos. Gracias por todo lo que me enseñaron. Los Amo. En la última parte de la carrera, llego a nuestras vidas la princesa más bella y hermosa de la casa, mi sobrina Avril que con su locura y travesuras unió muchísimo más a la familia.

Para continuar, siguen mis amigos, mis compañeros de la vida. Cada uno fue apareciendo en el momento justo y apropiado. Son la familia de corazón que uno elige. Gracias por estar en los momentos buenos y malos de la vida.

Tuve la oportunidad de conocer a personas increíbles que me llenaron el alma con sus locas maneras de ser que me dejaron enseñanzas para la vida. Gracias aprendí muchísimo de cada uno de ellos.

Me gustaría agradecer a la persona que me inicio en las ciencias duras, la persona que me hizo conocer la Geofísica. Gracias Daniel Córdoba, con tu emoción y pasión por la física hiciste que un día me replantee la idea de estudiar física, gracias por contarme que existía esta hermosa carrera. Gracias por motivar a tantos jóvenes a estudiar este tipo de carreras, por contagiarnos esas terribles ganas de aprender y de amar lo que uno elige muchas gracias.

Gracias MANOS que ayudan por demostrarme lo importante que es el otro, como uno puede ayudar simplemente compartiendo un momento con la gente en situación de calle y como uno puede aprender lo valioso de la vida, la lucha diaria que muchos llevan a cabo para salir adelante.

Quiero agradecer a la Dra. Gabriela Nicora, al Dr. Lucas Bali y al Dr. Javier Vasquez por la paciencia, la buena predisposición y el esfuerzo que tuvieron conmigo en este trayecto de la tesis. Muchas Gracias por todos sus consejos.

En especial quiero volver agradecer a la Dr. Gabriela Nicora. con quien durante la campaña de RELAMPAGO, tuve la oportunidad de convivir y conocerla. La verdad me lleve una gran sorpresa, es una persona muy fuerte, muy buena compañera, muy alegre, y lo más importante super sincera. Gracias por enseñarme y aconsejarme sobre la vida muchísimas Gracias.

Agradezco a la Facultad de Ciencias Astrónomicas y Geofísicas, a su gente y a sus profesionales por tratarnos como personas y no como un número más, por estar al pendiente de nosotros y darnos un millón de posibilidades para seguir estudiando. Muchas gracias.

Simplemente para terminar, una última reflexión que se aplica en todos los aspectos de la vida, Cuando se quiere de corazón se puede, siempre se puede!!! llevara un poco más de esfuerzo pero vale la pena.

MUCHAS GRACIAS.

Resumen

La región norte-central de Argentina es conocida como una de las regiones del mundo con tormentas más intensas. En esta zona, es frecuente el reporte de granizos, inundaciones, tornados, actividad eléctrica y fuertes ráfagas de vientos (Zipser y otros 2006[43]).

La región centro oeste del país, es una de las zonas que experimentan tormentas que producen algunos de los más grandes granizos del mundo. Sin ir más lejos, a principio el 2018, se registró en la ciudad de Villa Carlos Paz, provincia de Córdoba, granizos con diámetros de aproximadamente 19 centímetros. Por tales motivos y en función de la importancia de esta región a nivel mundial, es que se planteó y desarrolló en el año 2018 el Proyecto RELAMPAGO-CACTI con el objeto de estudiar las condiciones climáticas en las que estas tormentas se desarrollan, crecen e intensifican, para luego mejorar los modelos conceptuales de las mismas y la manera de pronosticarlas.

Debido a la importancia de esta región a nivel mundial, proponemos una manera original del estudio de estas tormentas por medio de la tasa de variación de la actividad eléctrica atmosférica asociada a dichos eventos. Según diferentes estudios (Williams, 1989[38], 1994 [39]; ,2001[41], 2013[42]; Price 2013 [26]; Avila y otros 2010[5]), Nicora 2010 [21], los cambios en la actividad eléctrica pueden indicarnos cambios en los procesos internos de las tormentas eléctricas, los cuales pueden utilizarse como marcadores de eventos severos en el corto plazo.

Utilizaremos como variable de estudio las variaciones abruptas (saltos "jump") de las descargas, según la metodología GeoRayos (Nicora y otros 2015[23]).

En la sección introductoria, presentamos los antecedentes de este trabajo de Tesis. En el capítulo 2, se presentan los aspectos teóricos de esta tesis. En el capítulo 3 se muestra el análisis y los resultados obtenidos en la caracterización de las variaciones en la Actividad Eléctrica Atmosférica en la zona definida entre las latitudes (-28° , -36°) y las longitudes (-70° , -60°), que corresponde a las ciudades de Mendoza, San Luis, San Juan, La Rioja, la zona sur de Catamarca y Santiago del Estero, Córdoba, Santa Fé y la zona noroeste de Buenos Aires y norte de La Pampa; para los años 2015, 2016 y 2017. En el capítulo 4, se presenta el Proyecto RELAMPAGO y un análisis de una de las campañas realizadas con el fin de obtener resultados in situ. Por último, se resumen las conclusiones obtenidas.

Aportes y objetivos del Trabajo

El objetivo general de la presente tesis es realizar la Caracterización de la Actividad Eléctrica Atmosférica en la zona central de la Argentina, definida entre las latitudes (-28° , -36°) y las longitudes (-70° , -60°), por medio de las variaciones en la tasa de descargas eléctricas para el período comprendido desde el 1 de Enero del 2015 al 31 de Diciembre del 2017. En la caracterización se tendrá presente los siguientes interrogantes:

- 1 ¿Cuáles son las zonas más frecuente de descargas eléctricas que producen Jumps?
- 2 ¿Que área promedio poseen estos Jumps?
- 3 ¿En que momento del año tenemos más Jumps?
- 4 ¿Existe alguna relación entre las tormentas con más Jumps registradas en el 2015 a 2017 y la distribución espacial de Jumps?
- 5 ¿En que momento del día se producen más?
- 6 ¿Existe alguna relación con el inicio de Convección?
- 7 ¿La topografía influye?

Para llevar a cabo dicho objetivo se utilizarón los datos emitidos por la World Wide Lightning Location Network (WWLLN), así como también la aplicación del algoritmo GeoRayos (Nicora y otros 2015[23]). El aporte fundamental que presentamos, es la caracterización de la zona de trabajo en función de trabajos geoestadísticos que nos permitieron evaluar las variaciones espacio-temporal de las variaciones de tasa de descargas como proxy de severidad meteorológica.

Cabe destacar que forme parte del trabajo de campo durante la campaña RELAMPAGO <http://relampago-cacti.org> lo cual contribuyó a una experiencia única en lo referente al conocimiento de estos procesos meteorológicos. En este marco pude realizar una evaluación in situ del algoritmo, así como también realizar un gran aprendizaje en la correlación de las descargas con otras variables meteorológicas. El algoritmo GeoRayos estuvo corriendo durante todo el periodo del experimento RELÁMPAGO, 15 de Agosto 2018 y el 30 de Abril del 2019, y particularmente una campaña de observación en la zona de Córdoba entre el 1 de Noviembre y el 15 de Diciembre del 2018.

Índice general

1. Introducción	13
2. Aspectos Teóricos	17
2.1. Eventos Severos	17
2.2. World Wide Lightning Location Network	17
2.2.0.1. Tiempo de Arribo de Grupo	19
2.3. Teoría de las variaciones de las tasas de descargas eléctricas asociadas a eventos severos.	19
3. Caracterización de la zona central de Argentina por medio de Jumps	25
3.1. Datos	25
3.2. Metodología	26
3.3. Herramientas	27
3.4. Análisis	28
3.4.1. Ciclo Diario	28
3.4.2. Análisis Exploratorio de la cantidad de rayos que forman cluster severos.	29
3.4.2.1. Análisis Anual y Mensual	31
3.4.3. Análisis Areal	39
3.4.4. Umbral del Cluster Severo	42
3.4.5. Análisis de las Etapas de Schultz.	44
3.4.5.1. Jumps sin Actividad eléctrica en sus primeras etapas de Schultz.	44
3.4.5.2. Jumps con Actividad eléctrica en todas sus etapas de Schultz	48
3.4.5.3. Comparación entre ambos grupos	51
3.4.6. Topografía	51
3.5. Conclusión	59
4. Campaña RELAMPAGO	61
4.1. Introducción al proyecto RELAMPAGO	61
4.2. Misiones e Instrumentación	62
4.3. Campañas	64
4.4. Descripción del Evento de del 10 de noviembre de 2018	70
4.4.1. Situación Meteorológica	70
4.4.1.1. Caracterización extraída del trabajo del Sumario de RELAMPAGO del 10 de Noviembre del 2018(http://catalog.eol.ucar.edu/relampago).	70

4.4.2. Evaluación de la Actividad Eléctrica Atmosférica y Jumps durante la misión. .	73
4.5. Conclusión de la campaña dentro del marco de este trabajo	77
5. Conclusiones	81
Bibliografía	85

Capítulo 1

Introducción

Los rayos y relámpagos son descargas eléctricas en la atmósfera, siendo su fuente más común las nubes de tormenta. Estas nubes presentan en su interior regiones con cargas eléctricas de distintos signos, las cuales desarrollan campos eléctricos a gran escala dentro de la nube y entre la nube y tierra. Cuando estos campos alcanzan valores suficientemente altos, se produce la ruptura dieléctrica del aire, generándose las descargas (Nicora 2010 [21]). La figura 1.1 muestra la clásica clasificación de descargas eléctricas atmosféricas según los centros de carga:

- intranubes (dentro de la nube),
- entre nubes,
- entre nube y tierra o tierra y nube,
- entre nube y aire.

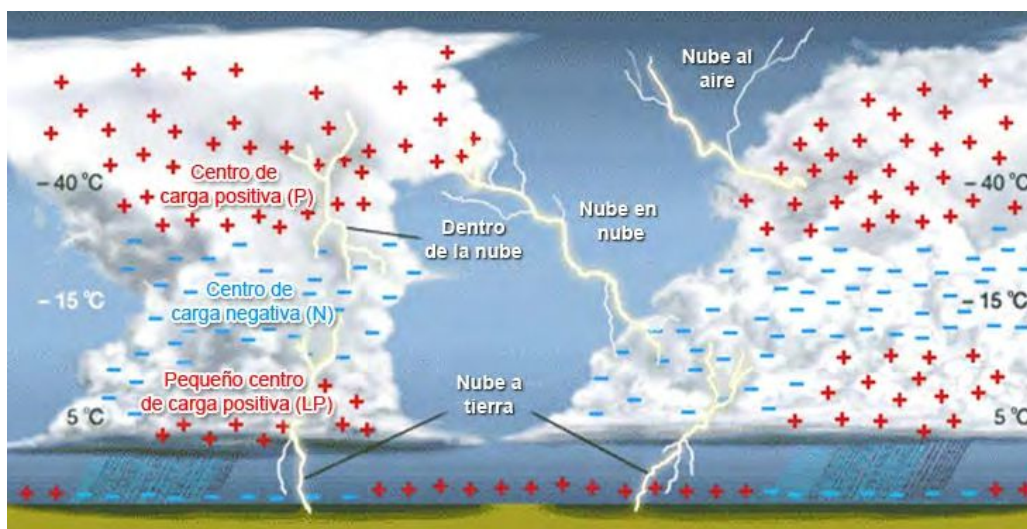


Figura 1.1: Diagrama de la localización de las regiones de carga y las diferentes descargas eléctricas atmosféricas en el sistema. Adaptado de Enciclopedia Británica. Imagen extraída de la Tesis Doctoral de Nicora 2010 [21]

Llamaremos Actividad Eléctrica Atmosférica (AEA) a los procesos de intercambio de carga dentro de la tropósfera y a las descargas eléctricas atmosféricas (DEA) (Nicora 2010 [21]). La actividad eléctrica

en las tormentas está fuertemente ligada a la microfísica y dinámica de las mismas y, por lo tanto, variaciones en ellas pueden indicarnos cambios en los procesos internos de las tormentas eléctricas. La energía eléctrica responsable de las mismas se relaciona directamente con la energía cinética proveniente de las corrientes ascendentes en una tormenta. Estas corrientes proveen un ambiente conveniente para los procesos de precipitación y fase mixta (hielo, agua, granizo) dentro de la nube, que asociados con la transferencia microfísica de carga pueden llevar a la formación de los centros de carga a escala de nubes.

Diversos trabajos demostraron la correlación existente entre las tendencias de la caída de rayos con la ocurrencia de fenómenos meteorológicos severos ya que, han observado un aumento de la misma algunos minutos antes de la aparición del tiempo severo (Williams y otros 1999 [40], Schultz y otros 2011 [33]). Estos aumentos abruptos en las tasas de descargas son denominados Jumps y usados como proxies de eventos severos. Entiendase como tiempo o evento severo, a aquel en donde se desencadenan fuertes rafagas de viento, mayores a 25 metros por segundo, granizos con diámetros mayores a dos centímetros, actividad eléctrica, inundación asociada a precipitación, y/o tornados.

En base a estos estudios se ha generado el algoritmo “GeoRayos” (<http://georayos.citedef.gob.ar>), basado en estudios previos (Schultz y otros 2011 [33]), y aplicado en Argentina (Nicora y otros 2015 [23]) para anticipar el desarrollo de tiempo severo, utilizando como base de datos los emitidos por la World Wide Lightning Location Network (WLLN, ver <http://wlln.net>).

Por otro lado, diferentes trabajos han mostrado que la zona norte - central de Argentina posee una alta tasa de sistemas convectivos muy intensos con respecto a la tasa de granizos, precipitaciones intensas y eventos extremos (Zipser y otros 2006 [43], Cecil and Blackeslee entre otros, 2012 [12]). Informes de granizo, áreas afectadas por intensas ráfagas y tornados, inundaciones y actividad eléctrica son reportes comunes en la zona. Debido a la escasez de datos en el área no sabemos mucho acerca de los aspectos de estos sistemas incluyendo lo que rige su estructura, la iniciación y el ciclo de vida, comportamientos extremos, impactos hidrometeorológicos, así como las similitudes y diferencias con tormentas severa observadas en otros lugares del mundo. Por lo que, teniendo en cuenta estos estudios se desarrolló en el año 2018 el Proyecto RELAMPAGO-CACTI (<http://www.relampago-cacti.org>) en el cual, se propusó desarrollar un programa experimental intensivo de medición con el apoyo de organismos nacionales e internacionales, para estudiar los aspectos de diversas escalas de tormentas que tienen características extremas. Entender y medir las tormentas ayudará luego a mejorar los modelos conceptuales de las mismas y así mejorar la forma de pronosticarlas.

Debido a estos antecedentes, el objetivo general del presente trabajo de tesis será generar un aporte a la climatología de aquellas zonas más propensas al desarrollo de eventos severos. Para la concreción del mismo, se elaborará un análisis estadístico de los marcadores de eventos severos (Jumps) en la zona norte-central de Argentina comprendida entre las latitudes (-28° , -36°) y las longitudes (-70° , -60°) para el periodo comprendido entre los años 2015-2017 a fin de definir una metodología de trabajo, para luego ser aplicada a una serie más larga de datos con el objeto de realizar una climatología a dicha área.

Capítulo 2

Aspectos Teóricos

2.1. Eventos Severos

Sudamérica Subtropical tiene las tormentas convectivas con mayor frecuencia de granizos en el mundo (Cecil and Blankenship 2012 [13]). En esta región, los sistemas convectivos tienden a generar fuertes lluvias, tornados, granizos y actividad eléctrica (Rasmussen y Housze 2011[27]). Pero, ¿Que es una Tormenta Convectiva? A la hora de hablar de tormentas convectivas, es importante definir a la misma ya que esta puede tener bastantes acepciones dependiendo de la intención del autor. Es decir, si el tema en el que se encuentra trabajando el autor es el análisis o predicción del tiempo severo, la definición frecuentemente usada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) requiere rafagas de vientos superior a 25 metros por segundo, granizos con diámetros mayores a 2 centímetros ó tornados. Si el tema son las tormentas eléctricas, los autores comparán la intensidad de la tormenta con la tasa de descargas eléctricas. En cambio, otros autores equiparan la intensidad con la magnitud de la corriente ascendente (Zipser y otros 2006 [43]).En nuestro estudio, definiremos Tormentas convectivas según la acepción usada por el Servicio Metereológico Nacional. A continuación se definen los umbrales usados por el SMN para definir a una tormenta como un evento severo:

- Rafagas de vientos mayores a 25 metros por segundo,
- Acumulación de granizos pequeños ó granizos con diámetros mayor o igual a 2 centímetros,
- Actividad eléctrica,
- Inundación asociada a precipitación y
- Cualquier tipo o intensidad de tornado.

2.2. World Wide Lightning Location Network

La World Wide Lightning Location Network (WWLLN) es una red de detección de tierra, de largo rango espacial que permite una detección de descargas eléctricas atmosféricas en todo el mundo y en tiempo real pero con una baja eficiencia de deteccin en comparación con las redes de corto rango y con los sistemas de detección satelital(Bürgesser 2017 [9]). Está red detecta ondas de muy baja frecuencia

(VLF: very low frequency) emitidas por los paquetes de ondas "Sferic"¹ de descargas individuales, por lo que está red es más sensible a las descargas a tierra que entre nubes (Abarca y otros 2010 [1]). Utiliza el Tiempo de Arribo de Grupo (TOGA)(explicación en la sección 2.2.0.1), junto con métodos de minimización para localizar la descarga (Dowden y otros 2002 [14]; Rodger y otros 2009 [30]). Todos los sistemas de detección que trabajan en este rango de frecuencias son redes globales, que permiten realizar un mapeo global de la actividad eléctrica atmosférica, debido a que las ondas de radio en VLF, pueden ser detectadas a más de cuatro mil kilómetros de distancia de la fuente. En la Figura 2.1 se muestra las posiciones de las descargas, que se representan como puntos de colores. Esta escala de colores representa el tiempo en el que ocurrió la descarga, donde el celeste indica la descarga más reciente que sucedió en los últimos 10 minutos, el verde en la última media hora y el amarillo en los últimos 40 minutos. Los asteriscos rojos en los círculos blancos son ubicaciones activas de sensores de descargas de esta red. El color gris representa las regiones de día.

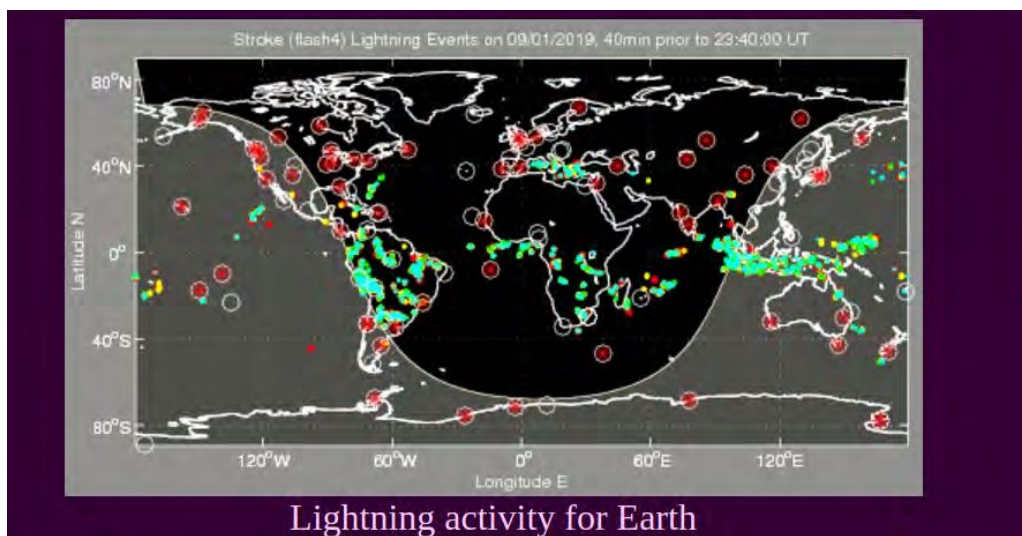


Figura 2.1: Actividad Eléctrica Atmosférica registrada por la red WWLLN. Imagen extraída de la página <http://wwlln.net>

Esta red provee datos de calidad sobre el océano y regiones remotas, donde las redes regionales no operan. A su vez, presenta una detección continua en el tiempo que no es proporcionado por instrumentos satelitales.

Abreu y otros 2010[2] evaluaron los datos de esta red en 2008 sobre la región centrada en el sur de Ontario, Canada y encontraron que está red es más sensible a los altos picos de los Strokes². Este estudio, mostró que cambios en la Ionósfera afectan la eficiencia de esta red. Para cada uno de estos Stroke, la red reporta su ubicación, el tiempo de ocurrencia con al menos cinco sensores, consiguiendo una precisión espacial y temporal de aproximadamente cinco kilómetros y menos de diez microsegundos respectivamente. Cada sensor consta de un receptor VLF y de un GPS. Cuando un evento es detectado, las señales recibidas por estos sensores, son digitalizadas y enviadas a la central de procesamiento. Actualmente, en Argentina contamos con 4 estaciones, ubicadas en Córdoba (FAMAF-UNC), en la División LIDAR perteneciente a CITEDEF (Villa Martelli, Bs. As.), en la Universidad

¹Sferic: Señal de radio generada por cada uno de los intercambios de carga entre dos centros de carga.

²Stroke: descarga individual que dura menos de un milisegundo. Está es tan rápida que no permite al ojo humano apreciarla de manera individual.

de la Patagonia en Trelew y en el Observatorio de la Patagonia Austral (OAPA) en Rio Gallegos.

2.2.0.1. Tiempo de Arribo de Grupo

Una descarga eléctrica atmosférica emite ondas electromagnéticas en una amplia gama de frecuencias. Las ondas de radio generadas por estas descargas, son llamadas ondas esféricas. Estas ondas se pueden medir a grandes distancias porque la Ionósfera se comporta como una guía de Ondas. La Figura 2.2 muestra el espectro de frecuencia emitido por una descarga y, los diferentes intervalos de frecuencias (VLF, LF, VHF) que se usan para detectarlas. Este rango de frecuencia es principalmente utilizado por las redes de detección de tierra.

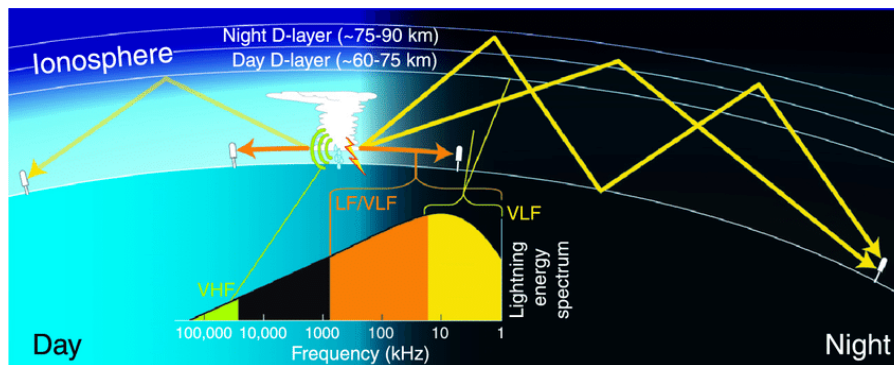


Figura 2.2: Diagrama esquemático de la guía de ondas tierra-ionosfera, que permite que las emisiones de VLF (3-30 kHz) de las tormentas (esféricas) se propaguen miles de kilómetros a través de la reflexión. La mejor propagación se observa sobre el océano por la noche. Imagen y texto extraído de A. Pessi y otros 2009[3]

Las Ondas de radio que se propagan en la Ionósfera, se conocen como Ondas Celestes, y a las que se propagan en la Tierra se las denomina Ondas Terrestres (A Lindanger 2018 [19]). Estas últimas, no viajan largas distancias a diferencia de las ondas celestes, por lo que se necesita una densa red de estaciones terrestres separadas como máximo unos cientos de kilómetros para lograr una precisión en la posición de la descarga eléctrica de hasta unos pocos cientos de metros (Dowden y otros 2002 [14]). La ubicación de la descarga se puede triangular en función de la diferencia en el tiempo de arribo (TOA) entre los primeros microsegundos del tren de onda, asociado a las ondas terrestres.

En cambio, las Ondas celestes como se propagan miles de kilómetros, es necesario contar con una red con menos estaciones para detectarlas. A medida que las ondas celestes viajan por la Ionósfera, el frente de onda se dispersa lo que lleva a tener una baja precisión en el tiempo y la ubicación de la descarga. La World Wide Lightning Location soluciona este problema, utilizando todo el tren de onda disperso y midiendo la tasa de cambio de fase esférica con respecto a la frecuencia, para encontrar el llamado Tiempo de Arribo de Grupo (TOGA) (A Lindanger 2018 [19]).

2.3. Teoría de las variaciones de las tasas de descargas eléctricas asociadas a eventos severos.

En las tormentas convectivas es frecuente observar un aumento rápido en la tasa de descargas eléctricas atmosféricas unos minutos antes del desarrollo del tiempo severo, estos aumentos abruptos

son denominados Jumps. La Figura 2.3 muestra un historial esquemático de la actividad eléctrica atmosférica (Williams y otros 1999[40]) en donde se muestra el pico de máxima actividad eléctrica antes de la máxima severidad y el cambio de pendiente correspondiente al Jump. En los trabajos de

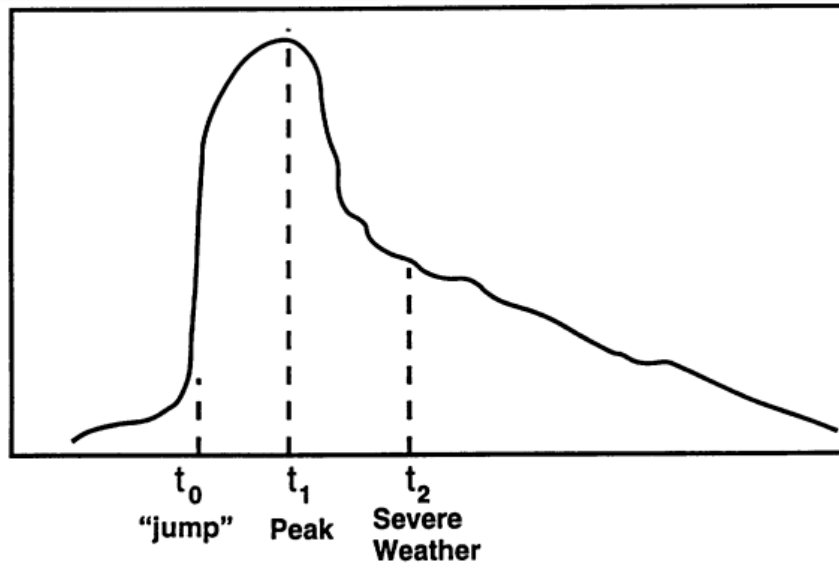


Figura 2.3: Historial de rayos esquemáticos en una tormenta de Florida del trabajo de Williams y otros 1999 [40] con $t_0 = \text{Jump}$; $t_1 = \text{Pico de AEA máxima}$; y $t_2 = \text{tiempo severo}$.

Schultz y otros 2009[32], y Gatlin y Goodman 2010[17], se demuestra la aplicabilidad operativa de los algoritmos de salto de relámpago total (Lightning Jump: LJ) en la detección de tiempo severo. En el trabajo de Schultz y otros 2009 se probaron seis configuraciones de algoritmos de LJ en tormentas no severas y severas, y determinaron estadísticamente que la configuración " 2σ " tenía la mayor promesa para un algoritmo operacional. La Figura 2.4 representa un diagrama del algoritmo de Schultz y otros 2011 [33], explicando gráficamente los pasos en la metodología utilizada para pronósticos de eventos severos. La misma se detalla a continuación:

1. Se calcula la tasa de actividad eléctrica atmosférica total cada 2 minutos, la cual llamaremos FR_{avg} . Se considera dos minutos debido a que para ese tiempo podemos filtrar ruido.
2. Si FR_{avg} es mayor o igual a 10 flashes por minuto, el algoritmo se activa. El umbral de 10 flashes (rayos) se determinó estadísticamente a partir de una gran muestra de tormentas severas y no severas en el trabajo de Schultz y otros 2009 [32] y es el que define Schultz en sus trabajos. En nuestro caso nuestro umbral es de 5 rayos cada dos minutos.
3. Luego, se consideran los 6 periodos consecutivos de 2 minutos anteriores al FR_{avg} , (0-2) minutos, (2-4) minutos, (4-6) minutos, (6-8) minutos, (8-10) minutos y (10-12) minutos. Se calcula para cada uno de estos la AEA total y luego se resta el valor de cada periodo con el siguiente, es decir:

$$DFRDT_{-5} = FR_{avg-4} - FR_{avg-5} \quad (2.1)$$

$$DFRDT_{-4} = FR_{avg-3} - FR_{avg-4} \quad (2.2)$$

$$DFRDT_{-3} = FR_{avg-2} - FR_{avg-3} \quad (2.3)$$

$$DFRDT_{-2} = FR_{avg_{-1}} - FR_{avg_{-2}} \tag{2.4}$$

$$DFRDT_{-1} = FR_{avg_0} - FR_{avg_{-1}} \tag{2.5}$$

La DFRT es proporcional a la derivada en el tiempo de la tasa de descargas.

4. En el paso anterior obtuvimos 5 valores de DFRT, con los que calculamos la desviación estándar σ .

$$\mu = \sum_{j=1}^5 \frac{DFRT_{-j}}{5} \tag{2.6}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^5 (DFRT_{-j} - \mu)^2}{5}} \tag{2.7}$$

5. Por último, se obtiene $2 * \sigma$ y se procede a realizar una comparación entre 2σ y el valor que activo el algoritmo ($FR_{avg} \geq 10$ flashes por minuto), que corresponde al $DFRDT_0$. Si $DFRDT_0$ supero a $2 * \sigma$ entonces ocurre un Jump y se emite una alerta durante 45 minutos para esa tormenta, indicando el posible desarrollo de tiempo severo dentro de los próximos 45 minutos. Es decir:

$$Si DFRDT_0 \geq 2 * \sigma \rightarrow Jump \rightarrow ALARMA. \tag{2.8}$$

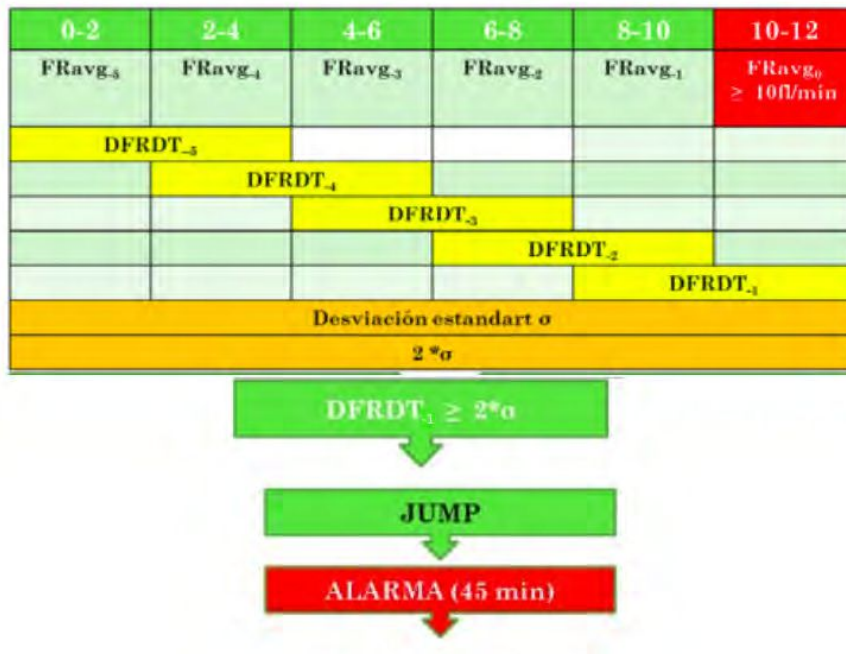


Figura 2.4: Diagrama explicativo del algoritmo de Schultz y otros 2011 [33]. Adaptado de la tesis doctoral de Nicora 2010 [21]

Teniendo presente este algoritmo y estudios previos (Williams y otros 1999 [40], Schultz y otros 2011 [33]), se generó el algoritmo GeoRayos con el objeto de anticipar el desarrollo de tiempo severo. El mismo consiste en el proceso de detección de actividad eléctrica durante las tormentas y el uso del algoritmo Nowcasting (<http://georayos.citedef.gob.ar>) para determinar tiempo severo. (Nicora y otros

2014 [22]). Los datos de descargas eléctricas usados provienen de la Red de localización World Wide Lightning (WWLLN, ver <https://wwlln.net>).

El algoritmo GeoRayos agrupa el rayo detectado por WWLLN que se encuentra dentro de un dominio espacial y un lapso de tiempo dado. La agrupación se realiza mediante el algoritmo Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) (Ester y otros 1996 [16]). DBSCAN utiliza dos parámetros principales para los datos del clúster, el parámetro Epsilon, distancia máxima a la que dos puntos podrían considerarse vecinos y, por lo tanto, posibles miembros del mismo clúster; y MinPts, número mínimo de puntos necesarios para que un conjunto se considere como un clúster. GeoRayos adopta 12 kilómetros para Epsilon y 2 puntos para MinPts.

Cada clúster determinado con DBSCAN, es considerado como un Cluster de Tormenta (SC: Storm-Cluster). Las Figuras 2.5 y 2.6 muestran los datos de las descargas del 29 de Noviembre del 2018 para las 19:00:00 (UTC) sin agrupamiento y con agrupamiento.

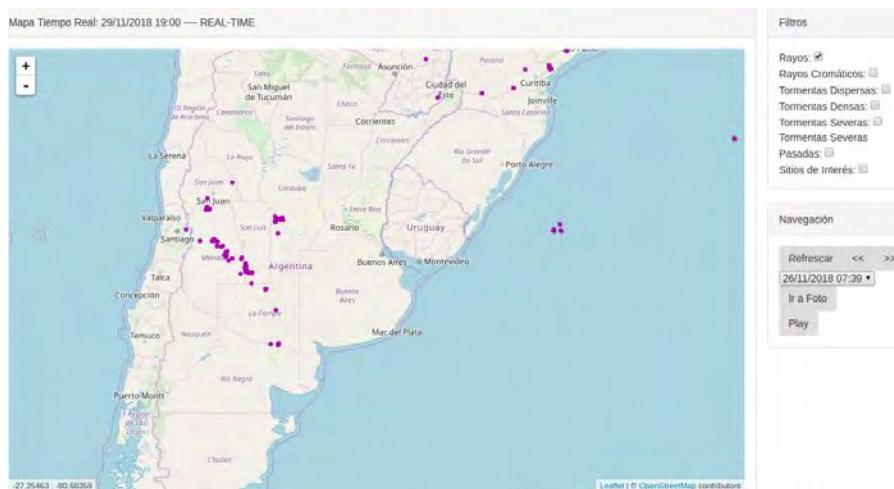


Figura 2.5: Descargas Eléctricas Atmosféricas sin clúster.

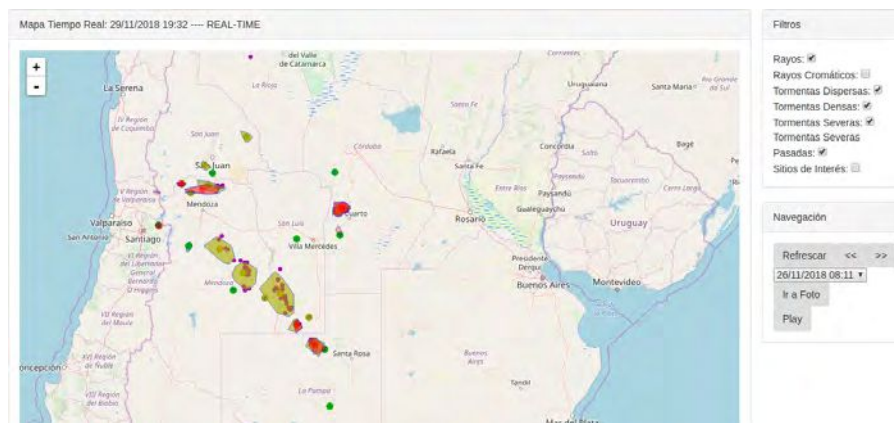


Figura 2.6: Descargas Eléctricas Atmosféricas con clúster.

Luego, de la clusterización, Georayos clasifica a cada uno como Denso y Dispersos (ver diagrama 2.7). Dicha clasificación se basa en la cantidad de rayos que contiene el Cluster de tormenta (SC) en los últimos 2 minutos (umbral de la tormenta). Es decir, si la cantidad de descargas es menor al umbral de la tormenta, el SC se considera como disperso, si no, se clasifica como denso. De ambos, los candidatos a desarrollar tiempo severo son los SC Densos, los cuales serán clasificados como Severos según como

2.3. TEORÍA DE LAS VARIACIONES DE LAS TASAS DE DESCARGAS ELÉCTRICAS ASOCIADAS A EVENTOS

varie en el tiempo la cantidad de descargas dentro de él. Por lo tanto, Georayos proporcionan una colección de Cluster de Tormentas diferenciados cada diez minutos, calificados según el umbral de la tormenta en dispersos (verde), densos (amarillo) y severos (rojo) (Nicora y otros 2015 [23]).

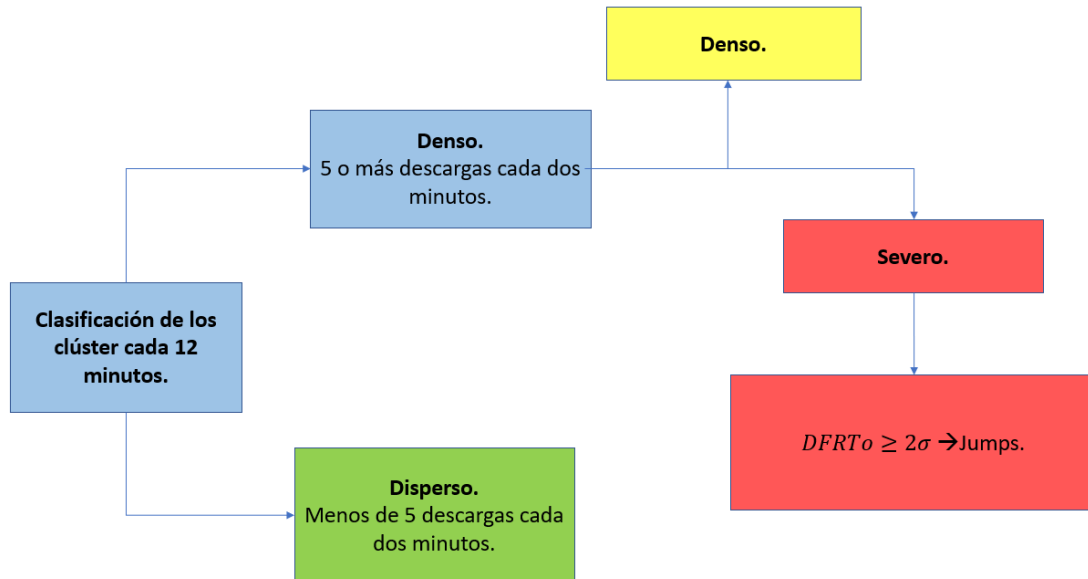


Figura 2.7: Diagrama explicativo de la clasificación de clúster.

GeoRayos tiene una página web pública (<http://georayos.citedef.gov.ar>) en la que la población en general, puede ver en tiempo real la actividad del rayo (ver 2.8) (Nicora y otros 2014 [22]).

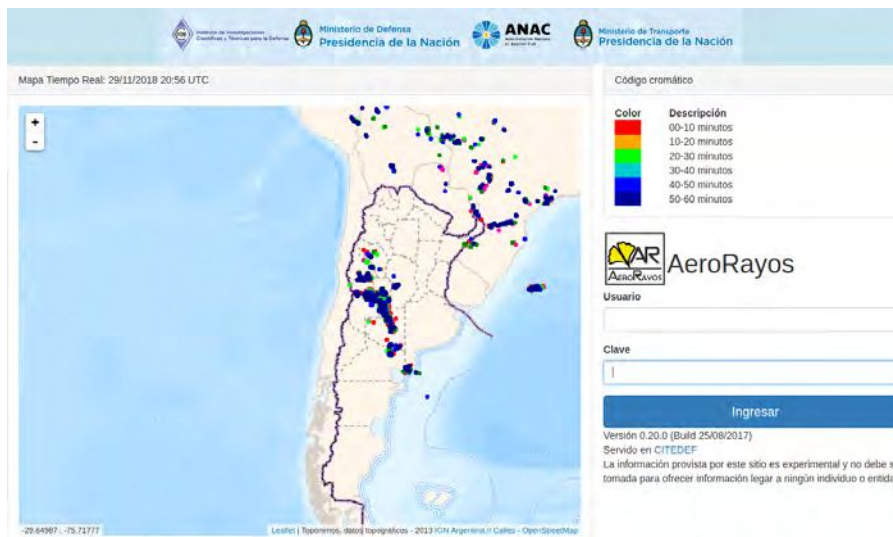


Figura 2.8: Portal web del proyecto GeoRayos.

Capítulo 3

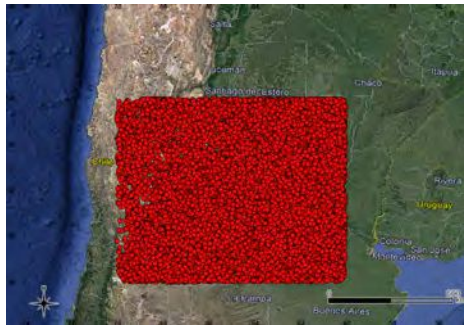
Caracterización de la zona central de Argentina por medio de Jumps

3.1. Datos

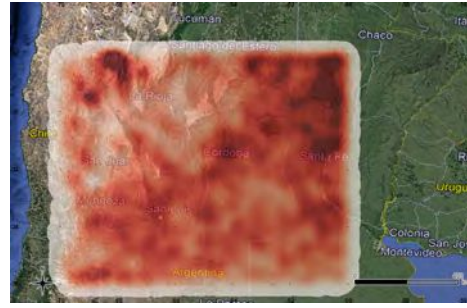
La zona norte-central de Argentina, se caracteriza por poseer una alta tasa de sistemas convectivos que generan eventos severos importantes (Zipser y otros 2006 [43] y Cecil y Blackeslee 2012[12]). Se trabajó en dicha región, latitud $[-28^\circ, -36^\circ]$ y longitud $[-70^\circ, -60^\circ]$ para el periodo comprendido entre 2015-2017, con los datos obtenidos por la red WWLLN, procesados por el algoritmo Georayos y clasificados como Severos según el umbral de la tormenta definido en el trabajo de Nicora y otros 2015[23]. En las figuras 3.1 y 3.2a se observa la zona de estudio, donde cada punto rojo representa la posición de un Jump (Ver seccion 2.3). Se realizó un mapa de calor a los mismos (Fig. 3.2b), del que se distinguen tres zonas por su mayor frecuencia de Jumps: La Rioja, Córdoba y Santa Fé. Estas zonas serán analizadas en la sección 3.4.6.



Figura 3.1: Región de estudio.



(a) Mapa de los datos de Jumps.



(b) Mapas de calor de los Jumps.

Figura 3.2: Distribución espacial de los Jumps.

El Formato de los datos que se presenta en la Figura 3.3 se detalla a continuación:

- ID: Identificación del clúster.
- Tipo de Clúster: Representa la intensidad de la Tormenta. Cada clúster es clasificado por GeoRayos como Disperso, Denso o Severo. Ver subsección 2.3. En esta tesis, trabajaremos con aquellos clúster que fueron clasificados como Severos.
- Fecha: Día y Hora (Local) del Jump.
- Centroides de Latitud: Latitud del centro del clúster severo.
- Centroides de Longitud: Longitud del centro del clúster severo.
- Área: Región asociada al clúster severo. Unidades en metros cuadrados.
- CantRayos: Cantidad Total de descargas eléctricas atmosféricas que se produjeron en un lapso temporal de media hora.
- EtSchultz: Etapas de Schultz. Ver sección 2.3

ID	Tipo de Cluster	Fecha	Centroides de		Área	CantRayos	Et_Schultz					
			Latitud	Longitud			0	1	2	3	4	5
							2 minutos	4 minutos	6 minutos	8 minutos	10 minutos	12 minutos

Figura 3.3: Formato de los datos

3.2. Metodología

Se analizó los datos de Actividad Eléctrica Atmosférica clasificados como Severos por el algoritmo GeoRayos, comprendidos en la región central de Argentina, definida entre las latitudes $[-28^\circ, -36^\circ]$ y las longitudes $[-70^\circ, -60^\circ]$ para el periodo comprendido entre los años 2015, 2016 y 2017. Para realizar el estudio de los mismos se procedió de la siguiente forma:

1. Se llevó a cabo un Análisis Diario de los Jumps.
2. Luego, se realizó un Análisis Exploratorio de la cantidad total de rayos que forman cluster severos. También se analizó su variación anual y mensual.

3. Para continuar, se estudio el Área de cada clúster severo a través de un análisis estadístico univariado y bivariado.
4. A partir del análisis estadístico de la última etapa de Schultz correspondiente a los dos últimos minutos de la etapa, se estudio el Umbral del cluster severo.
5. Se filtraron los datos, teniendo en cuenta la cantidad de descargas que tenia cada etapa de Schultz y se los dividio en dos grupos. Por una lado aquellos sin AEA en sus primeras etapas de Schultz y por el otro aquellos jumps con AEA en todas sus etapas de Schultz. A ambos grupos se le realizó un análisis estadístico clásico y se estudio su distribución espacial y temporal.
6. Por último, se selecciono una misión del proyecto RELAMPAGO-CACTI con el fin de validar GeoRayos.

3.3. Herramientas

En el análisis de los datos se utilizaron los siguientes programas:

1. SGeMs: Stanford Geostatistical Modeling Software. Es un paquete informático de código abierto para resolver problemas relacionados con variables espacialmente relacionadas. Proporciona una interfaz fácil de usar, una visualización en tres dimensiones interactiva y una amplia selección de algoritmos. Posee una consola de Python, la cual permite a los usuarios realizar tareas complejas y desarrollar nuevos algoritmos utilizando el mecanismo de complemento SGeMS. (<http://sgems.sourceforge.net>) Empleando este programa, hemos realizado el análisis estadístico y geoestadístico de los datos.
2. QGIS: Quantum Gis. Es un Sistema de información geográfico (SIG) libre y de código abierto, licenciado bajo GNU: General Public License. Es un proyecto oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo) e impulsado por voluntarios. Actualmente funciona en la mayoría de plataformas, Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android. Soporta numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos ráster y bases de datos. Permite analizar, visualizar, editar datos y crear mapas. Así como SGeMs, este programa también posee una consola Python. Su página web es <https://www.qgis.org/es/site/> Aprovechando QGIS se crearon los mapas de calor de los datos y los perfiles topográficos.
3. GMT: Generic Mapping Tools. Es una colección de código abierto de aproximadamente 65 herramientas de línea de comandos para manipular conjuntos de datos geográficos y cartesianos. GMT es compatible con más de 30 proyecciones y transformaciones de mapas y requiere datos de apoyo como las líneas costeras, ríos y fronteras políticas. GMT es desarrollado y mantenido por Paul Wessel, Walter H. F. Smith, Remko Scharroo, Joaquim Luis y Florian Wobbe, con la ayuda de un grupo mundial de voluntarios, y cuenta con el respaldo de la Fundación Nacional de Ciencia. (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>) Con esta herramienta, hemos realizado la tabla de datos y el mapa con las mayores DEA del 2015-2016 y 2017.
4. Python: Lenguaje de programación de código abierto, que permite trabajar más rápidamente. Además, permite tener varios estilos de programación porque es un lenguaje de programación

multiparadigma, ya que soporta orientación a objetos, programación imperativa y parcialmente funcional <https://www.python.org>. Usando esta herramienta se aportaron los datos filtrados por hora y por zona para luego ser trabajados en QGIS y SGeMS. Además, con python hemos realizado todos los gráficos de barra, boxplots que se observan en el trabajo y los mapas con mayores descargas eléctricas atmosféricas (DEA) para 2015-2017 representando de manera esquemática el área de cada cluster severo como un círculo.

5. GNU-Octave: Lenguaje de programación científico para realizar cálculos numéricos. Con una sintaxis orientada a las matemáticas con herramientas integradas de trazado y visualización. La misma, es compatible con Matlab. Este lenguaje está orientado al análisis numérico. Podemos descargarlo de forma gratuita de <https://www.gnu.org/software/octave/>. Con la ayuda de este lenguaje hemos filtrado los datos para luego ser usados en la confección de los mapas de calor de los diferentes tipos de Jumps.

3.4. Análisis

3.4.1. Ciclo Diario

Para estudiar el ciclo diario de los Jumps se realizó un gráfico de barras, que representa el total acumulativo por hora de los Jumps que sucedieron a lo largo del periodo de estudio (ver Figura 3.4). Observando al mismo tenemos durante las horas de la noche (19-21 pm) las horas de máxima frecuencia de Jump. Esto concuerda con el trabajo presentado en la tesis doctoral Nicora 2010([21]) sobre el ciclo diario de la Actividad Eléctrica Atmosférica, en donde observamos como este ciclo varia por zonas. Para nuestra región de Estudio, el gráfico correspondiente es el ubicado a la derecha de la Figura 3.5 y señalado con una flecha roja, en el mismo tenemos para la hora local, los datos de la WWLLN y de LIS. Rasmussen y otros 2014, en sus trabajos muestran como para las horas nocturnas de Sudamérica, se produce la máxima AEA asociadas con tormentas con núcleos convectivos profundos y de Mesoescala.

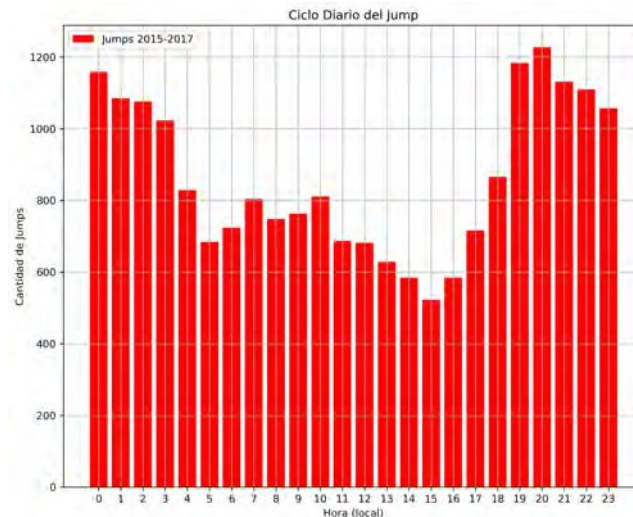


Figura 3.4: Ciclo diario de los Jumps.

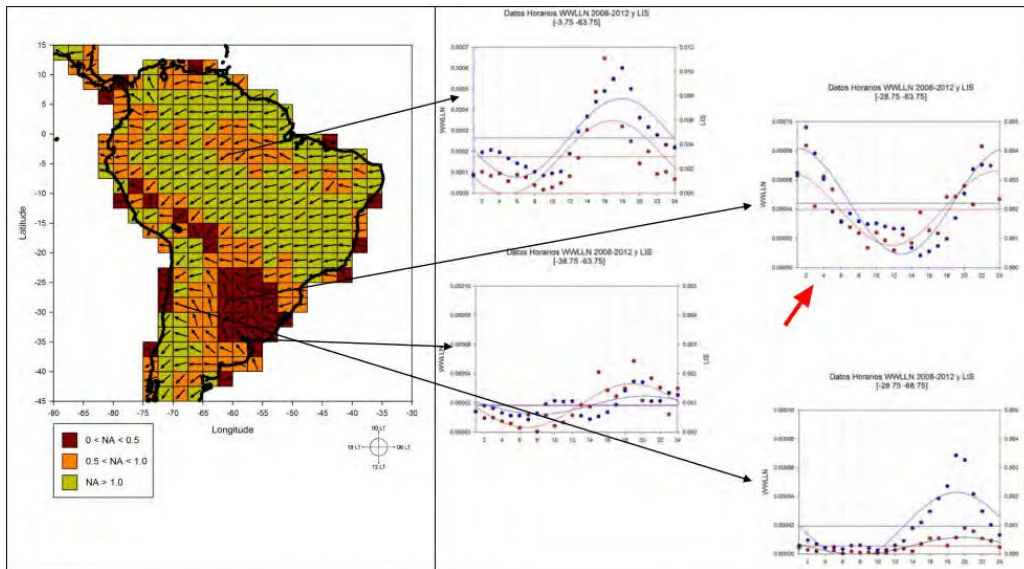


Figura 3.5: Ciclo diario de la AEA en la región tropical de Sudamérica (LIS/OTD) con detalle de la cantidad de descargas por hora en puntos para los datos y línea continua del ajuste WWLLN - LIS/OTD (en azul y rojo correspondientes). Imagen extraída de la Tesis Doctoral de Nicora [21]. La Flecha roja indica el gráfico que corresponde a nuestra zona de estudio.

Por lo tanto, el comportamiento diarios de los Jumps es el siguiente, comienza con una frecuencia bastante alta de Jumps para la madrugada disminuyendo gradualmente en el día hasta alcanzar el mínimo a las 15:00. A partir de este, la actividad aumenta hasta llegar a la máxima frecuencia de Jumps para las 20:00, luego disminuye y vuelve aumentar para las 00:00.

3.4.2. Análisis Exploratorio de la cantidad de rayos que forman cluster severos.

Consideraremos la AEA como un elemento de comportamiento aleatorio, es decir que si bien no se puede saber dónde y cuándo caerán los rayos (y sus respectivos jumps asociados), estos presentarán tendencias probabilísticas que pueden favorecer distintas ubicaciones y tiempos por sobre otros. Sobre este objeto procederemos a realizar estudios de estadística descriptiva con el objetivo de poder obtener características de la misma, como por ejemplo mediante el uso de herramientas de visualización tales como el histograma y el boxplot, y también a través del despliegue de estadísticos de resumen sobre centralidad y dispersión de los datos.

En ese sentido, considerando un total de $n = 20679$ jumps llevamos a cabo un histograma de la variable cantidad de rayos para el período 2015-2017. Observando la Figura 3.6, se detecta una tendencia logarítmica que incluso se preserva mediante una transformación logarítmica.

El gráfico de la izquierda de la Figura 3.7 tenemos representado un diagrama de boxplot de la cantidad de rayos por jump, mientras que en la tabla 3.1 mostramos los estadísticos resumen. Concluimos a partir de los mismos y el histograma 3.6 que la distribución presenta una fuerte asimetría a derecha junto con una gran cantidad de valor extremos que no la hace identificable con un comportamiento gaussiano. Debido a la presencia de Outliers que se observan en el diagrama de boxplot y teniendo en cuenta el rango intercuartiles realizamos la figura que se encuentra a la derecha de la Figura 3.7, de la cual podemos decir que la cantidad de rayos se mantiene conservado, con una tendencia general a tener menos de 60 descargas por Jump.

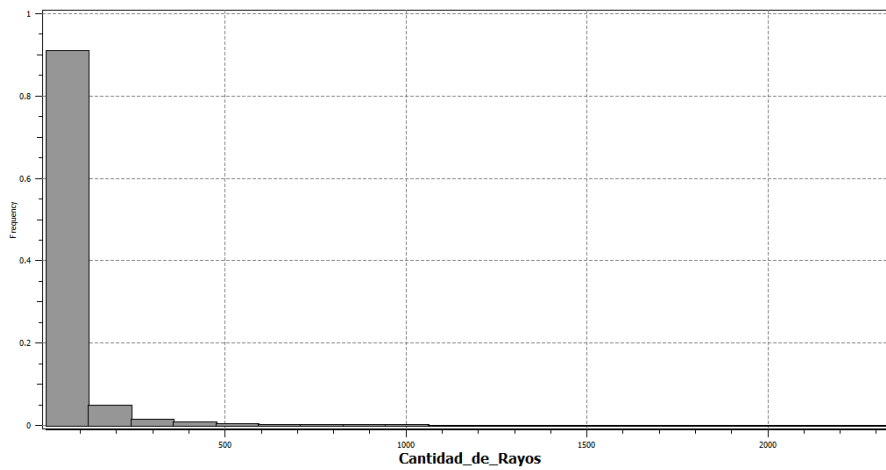


Figura 3.6: Histograma de la cantidad total de rayos.

<i>Estadísticos Resumen de la Cantidad de Rayos.</i>	
<i>Media</i>	52.51
<i>Desvio Estandar</i>	118.85
<i>Máximo</i>	2350
<i>Mínimo</i>	5
<i>Cuartil 1 (75 %)</i>	445
<i>Mediana</i>	19
<i>Cuartil 3 (25 %)</i>	9
<i>Rango Intercuartil</i>	36

Tabla 3.1: Estadísticos resumen que describen el comportamiento de la variable Cantidad de Rayos.

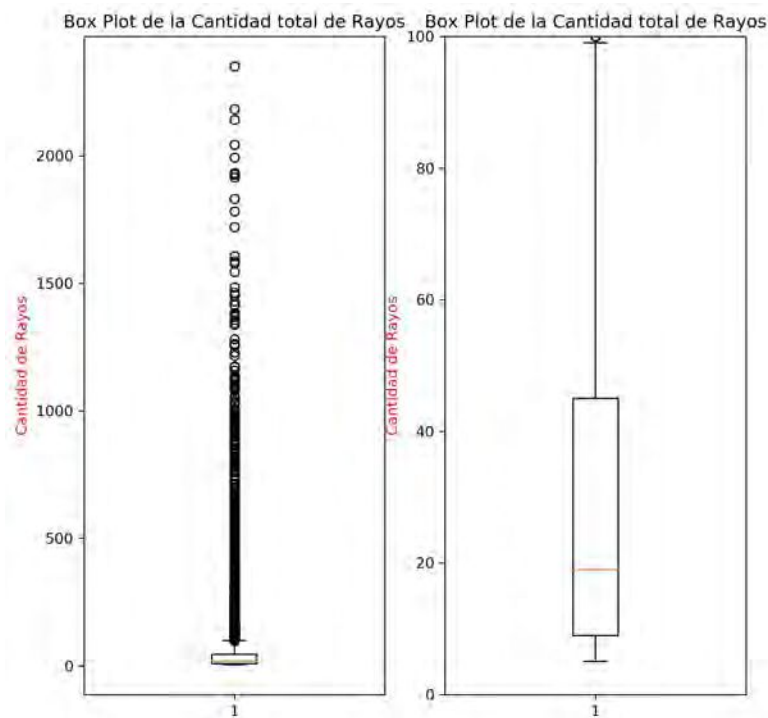


Figura 3.7: Izq.:Boxplot de la cantidad total de rayos. Dcha.:Boxplot de la cantidad total de rayos realizado teniendo en cuenta el rango intercuartil y la presencia de outliers que se observa en la figura de la izquierda.

3.4.2.1. Análisis Anual y Mensual

Proseguiremos con el estudio de la evolución Anual y Mensual de esta variable. En el análisis anual se confeccionó el gráfico 3.8 donde se marca el evento con mayor AEA para cada año, obteniendo un total de 2350 descargas eléctricas en San Justo, provincia de Santa Fé para el 2015, 2042 descargas en Rio Segundo provincia de Córdoba para el 2016 y 1485 descargas en Marcos Juárez, provincia de Córdoba para el 2017. Si observamos el gráfico, vemos que los meses de verano (Diciembre- Febrero) presentan un aumento en la AEA disminuyendo a medida que nos acercamos al otoño. En Otoño-Invierno tenemos el minimo de AEA anual, aumentando hacia finales del Invierno y principio de Primavera.

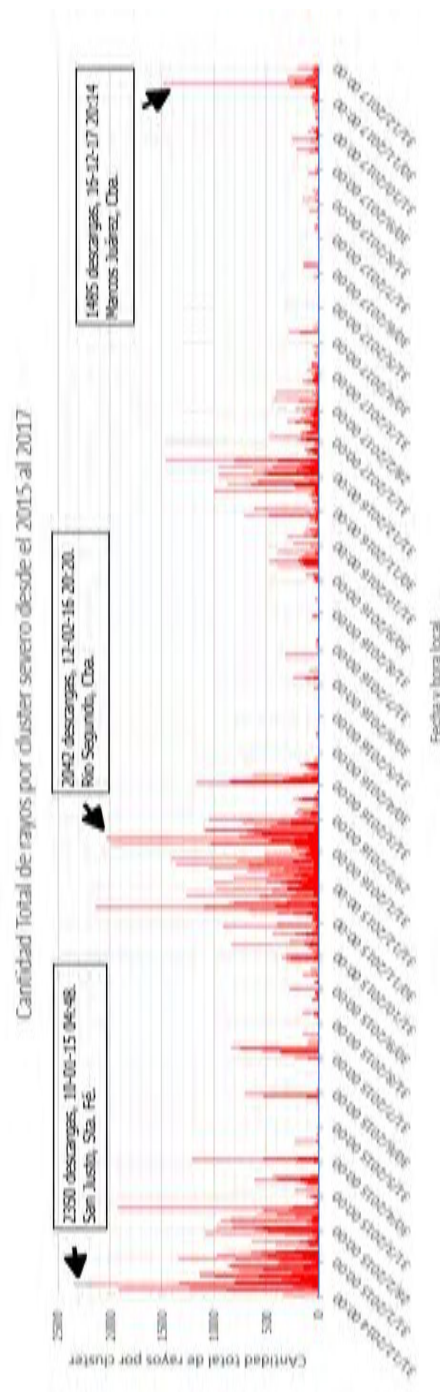


Figura 3.8: Ciclo anual de la cantidad de rayos que generan un cluster severo.

Intervalos de Altura	Jumps registrados	Intervalos de Altura	Jumps registrados
0-100 m	22	0-50 m	2
		50-100 m	20
100-200 m	8		
200-300 m	1		
300-400 m	1		
400-500 m	1		
500-600 m	3		

Tabla 3.2: Separación de Jumps con mayores descargas según la altura con respecto al nivel medio del mar de la ciudad asociado al mismo.

Continuando con el análisis mensual, se realizaron los mapas 3.9 a 3.14 en donde se observan los jumps con mayor AEA. En los mapas 3.9 a 3.11, tenemos una tabla que contiene información sobre la latitud, longitud, Fecha y hora local, cantidad de rayos, ciudad, altura con respecto al nivel medio del mar y etapas de Schultz de estos eventos. Estas etapas serán analizadas en la sección 3.4.5, por lo pronto observemos como para todos estos Jumps, cada etapa de Schultz presenta Actividad. En los mapas observamos una importante concentración al este de la región de estudio.

En los mapas 3.12 a 3.14 también se representa la ubicación de estos Jumps, pero esta vez, se tuvo en cuenta el área del Cluster Severo, considerandola en forma esquemática circular. Observemos como el tamaño en el área de descarga es muy variable, desde un pocos kilómetros cuadrados para los meses con menor AEA (Mayo- Septiembre) hasta cientos de km² para los meses con mayor AEA (Octubre-Febrero).

Observando las tabla de las figuras 3.12, 3.13 y 3.14 tenemos que las ciudades de San Cristobal, General López, Verá, 9 de Julio, ciudades de la Provincia de Santa Fé y San Justo de la provincia de Córdoba, poseen un alto índice de Jump y por ende son ciudades más propensas a Eventos Severos. Si prestamos atención a la hora en la que ocurren dichos eventos,tenemos 19 casos de 36 que se dieron entre las 00:00-06:00,8 entre las 06:00-13:00, 2 entre las 13:00-19:00 y 7 entre 19:00 y:00. Por lo que la mayor cantidad de este tipo de tormentas se da en las horas de las madrugadas. Con respecto a la altitud, observando la tabla 3.2 se encontró que para la mayoría de estos eventos su altura predomina entre los 50 y 100 metros, debido a que se encontraron 20 eventos con alturas entre 50 y 100 metros, 2 entre 0 y 50 metros, y 14 enventos con alturas mayores a 100 metros. Se obtuvo una altitud media de 139 metros.

Por último, se trabajo con información meteorológica para los días de Jumps con mayores DEA correspondiente al 2017 y se le realizó un estudio descriptivo. Para realizar este estudio, se conto con la información aportada por el Servicio Meteorológico Nacional y en algunos casos con información de los diarios locales. Para considerar que el Jump estaba asociado a dicho fenómeno se tuvo en cuenta el área del cluster severo y que el suceso haya ocurrido como máximo una hora antes o despues del Jump. Analizando el mapa 3.15 junto con los datos aportados por el SMN, se confecciono la Tabla 3.3, de la que se obtuvo en generalque este tipo de Jump anteceden una granizada. Al ser solo un año al que se le realizo este estudio, no se puede concluir de manera general, para eso se necesitaria trabajar con más años.

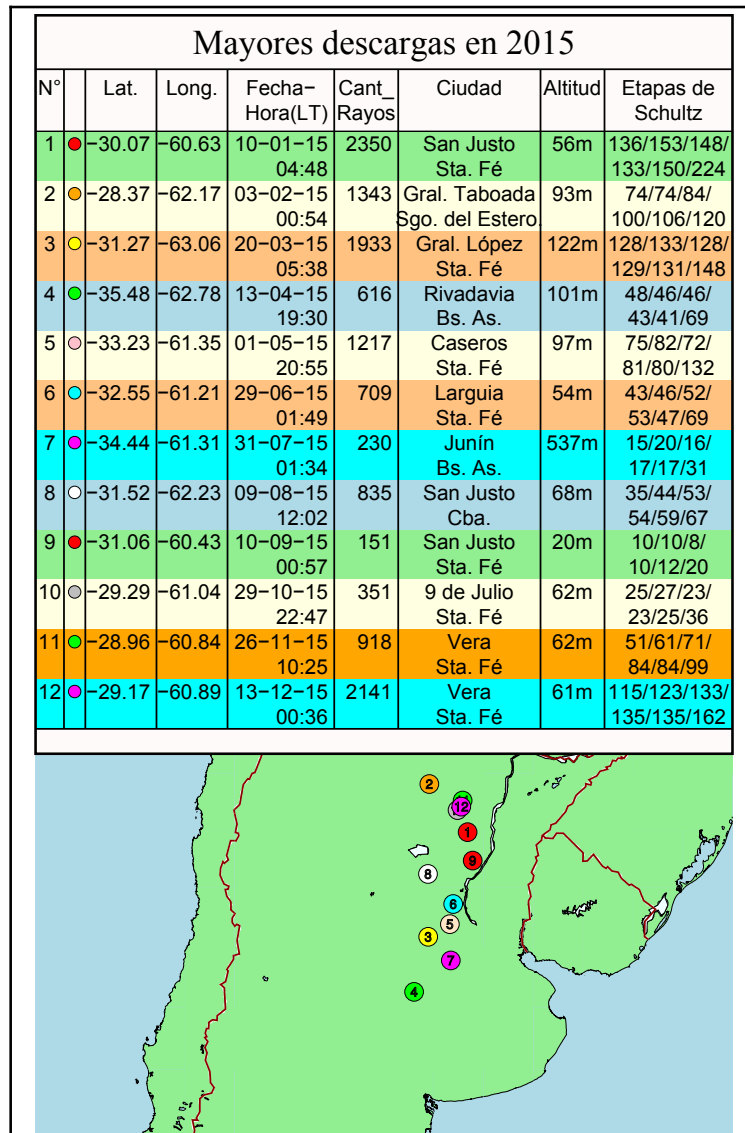


Figura 3.9: Mayores descargas eléctricas atmosféricas que generaron Jumps durante el 2015.

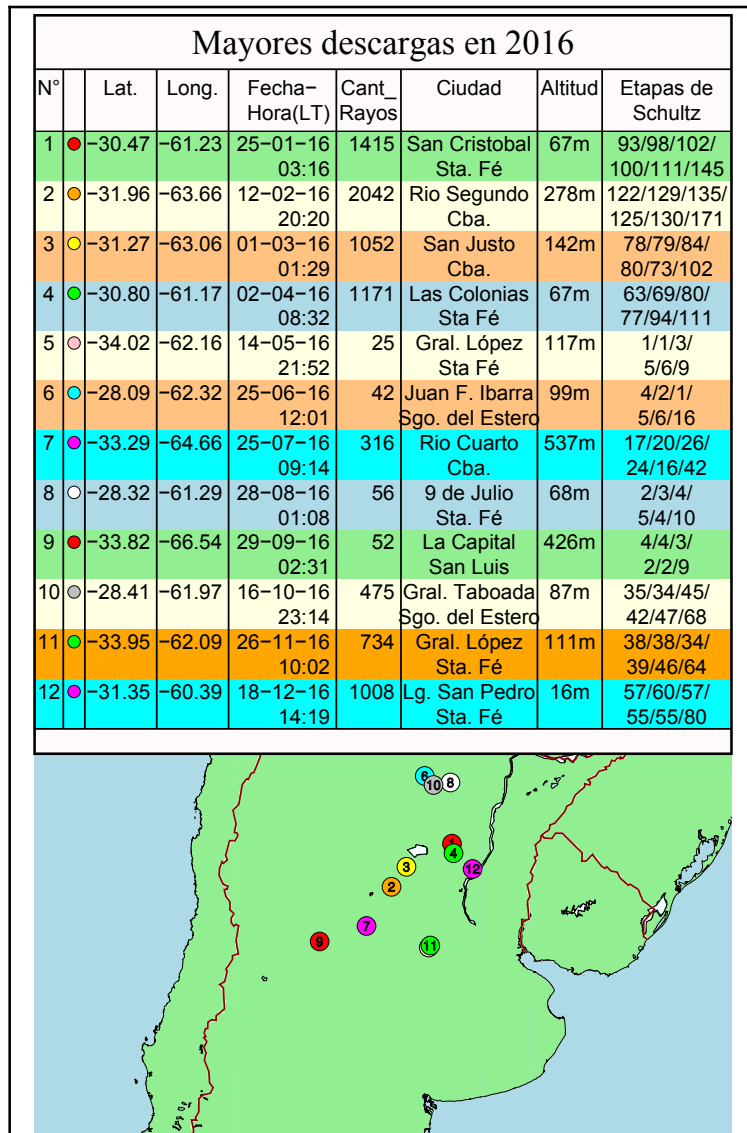


Figura 3.10: Mayores descargas eléctricas atmosféricas que generaron Jumps durante el 2016.

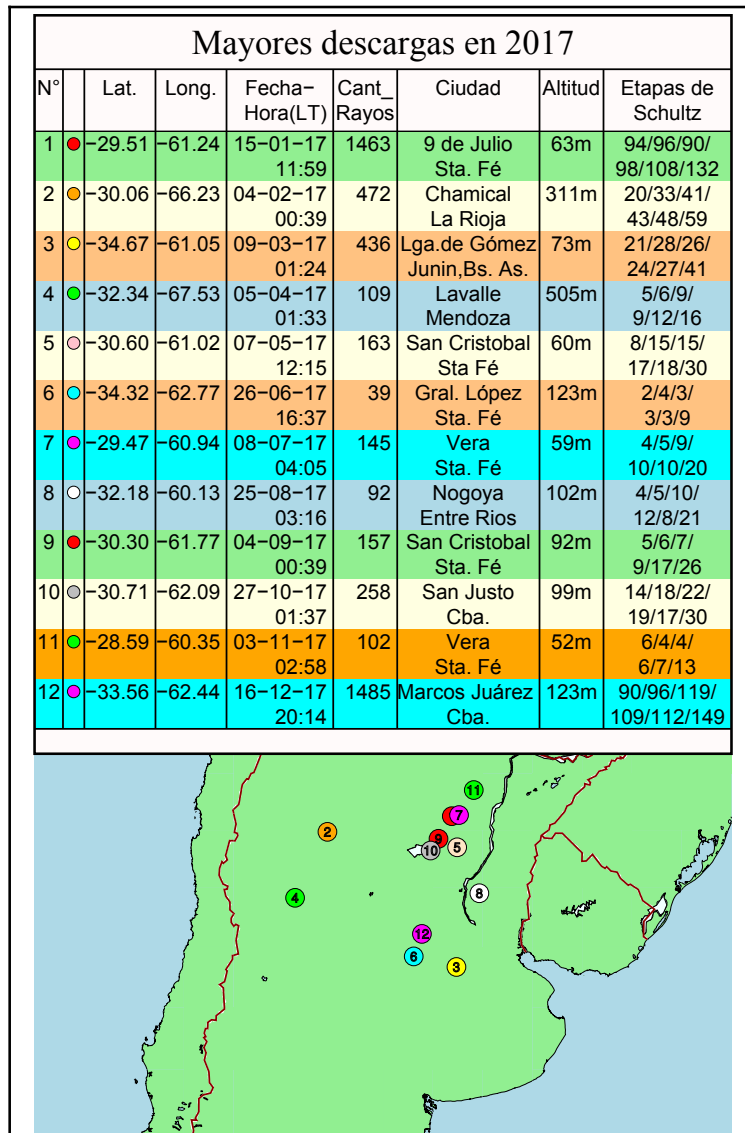


Figura 3.11: Mayores descargas eléctricas atmosféricas que generaron Jumps durante el 2017.

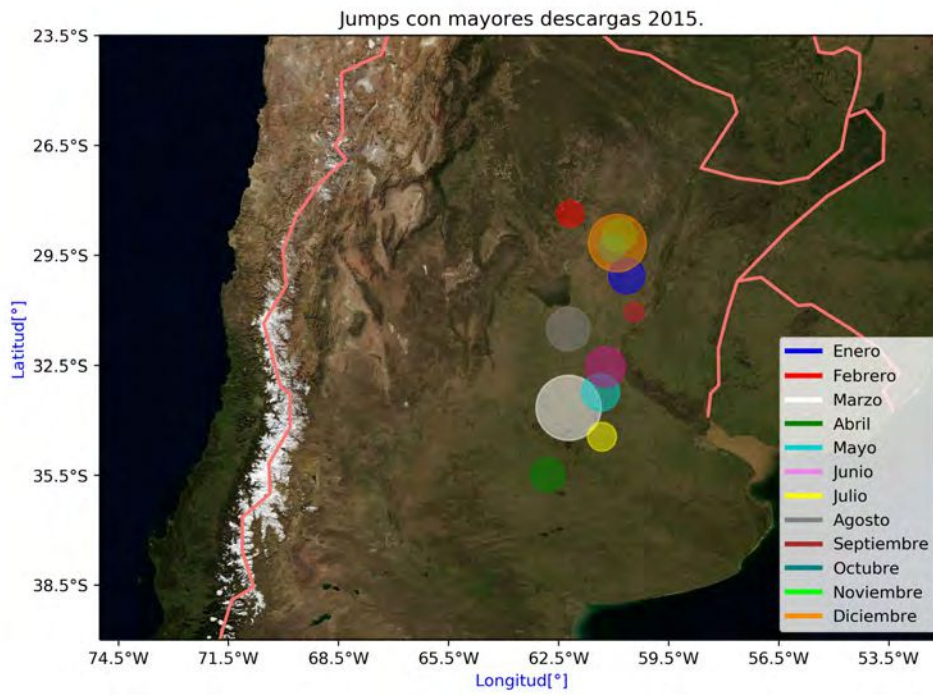


Figura 3.12: Mayores DEA que generaron Jumps durante el 2015. El círculo representa la zona de descarga.

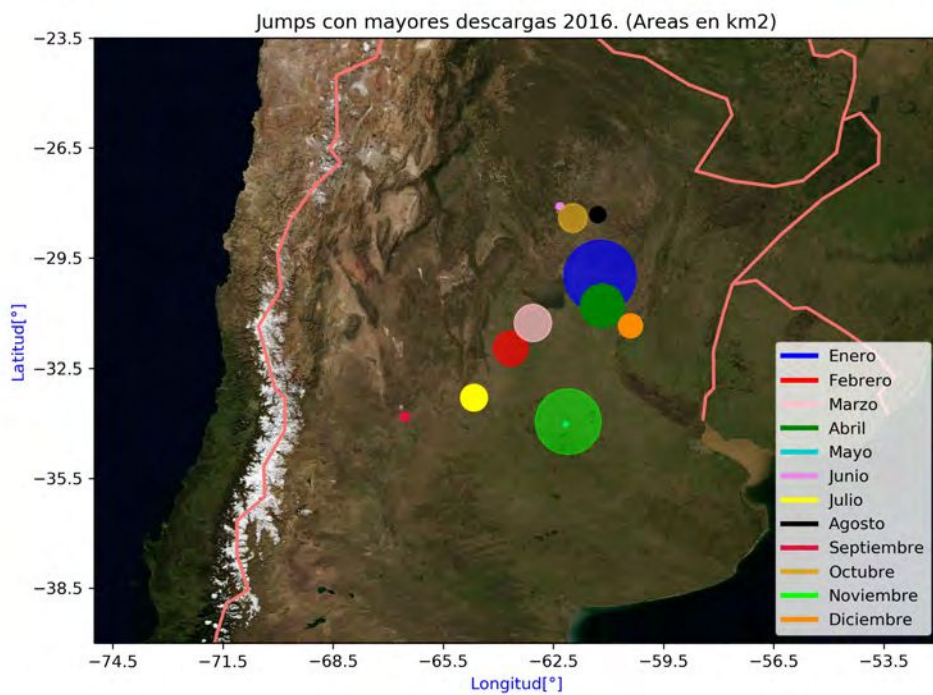


Figura 3.13: Mayores DEA que generaron Jumps durante el 2016. El círculo representa la zona de descarga.

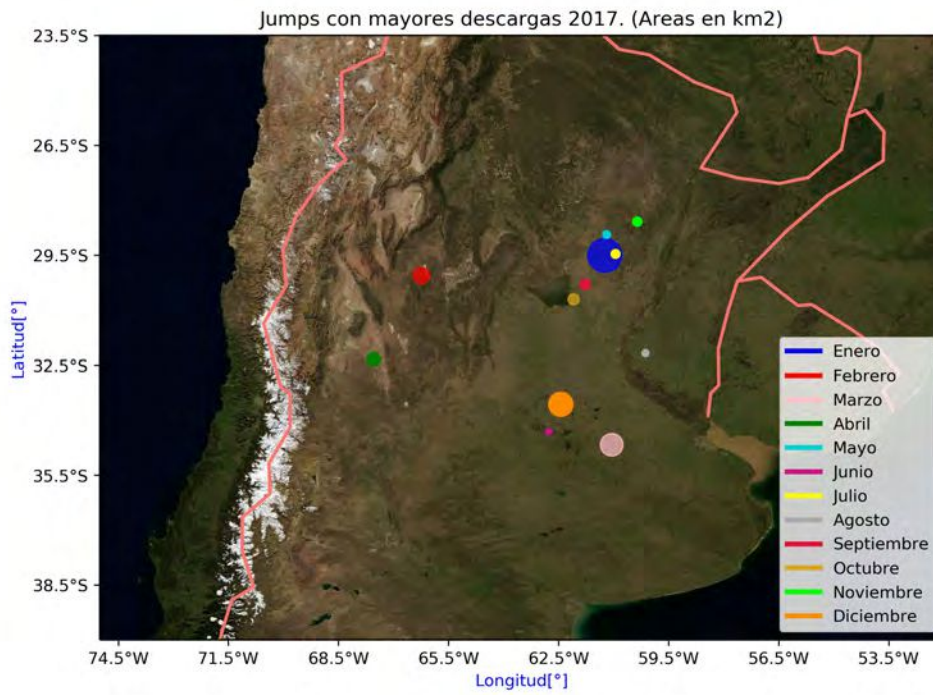


Figura 3.14: Mayores DEA que generaron Jumps durante el 2017. El círculo representa la zona de descarga.

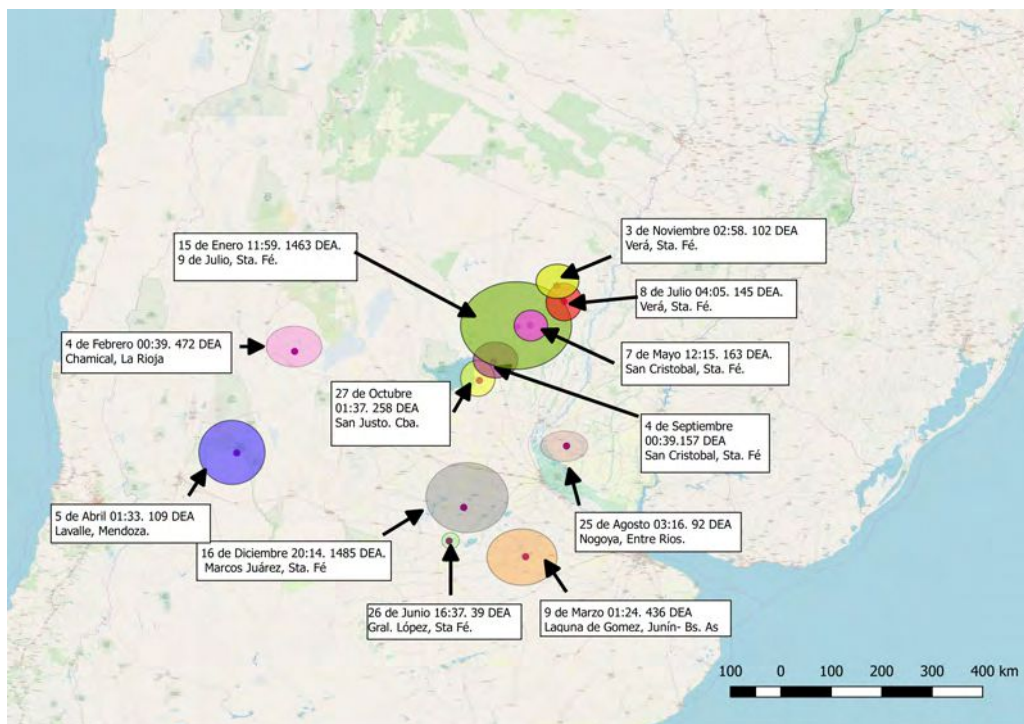


Figura 3.15: Zonas con mayores descargas durante el 2017.

Jumps	Eventos registrados
15 de Enero a las 11:59. Localidad: 9 de Julio, Sta. Fé. DEA: 1463	11:53 LLUVIAS INTENSAS. 12:25 TORMENTAS FUERTES CON RAFAGAS Y OCASIONAL CAIDA DE GRANIZO. https://www.ellitoral.com/index.php/diarios/2017/01/15/metropolitana/AREA-01.html
4 de Febrero a las 00:39. Localidad: Chamical, La Rioja. DEA: 472	No se encontro información al respecto.
9 de Marzo a las 01:24. Localidad: Junín, Bs. As. DEA: 436	01:51 TORMENTAS SEVERAS CON RAFAGAS Y CAIDA DE GRANIZO.
5 de Abril a las 01:33. Localidad: Lavalle, Mdoza. DEA: 109	No se encontro información al respecto.
7 de Mayo a las 12:15. Localidad: San Cristobal, Sta. Fé. DEA: 163	No se encontro información al respecto.
26 de Junio a las 16:37. Localidad: Gral. López, Sta. Fé. DEA: 39	16:42 TORMENTAS FUERTES CON RAFAGAS Y OCASIONAL CAIDA DE GRANIZO.
8 de Julio a las 04:05. Localidad: Verá, Sta. Fé. DEA: 145	04:58 TORMENTAS FUERTES CON RAFAGAS Y OCASIONAL CAIDA DE GRANIZO.
25 de Agosto a las 03:16. Localidad: Nogoya, Entre Rios. DEA: 92	02:31 TORMENTAS FUERTES CON RAFAGAS Y OCASIONAL CAIDA DE GRANIZO. 04:01 TORMENTAS FUERTES CON RAFAGAS Y OCASIONAL CAIDA DE GRANIZO.
4 de Septiembre a las 00:39. Localidad: San Cristobal, Sta. Fé. DEA: 157	01:09 TORMENTAS FUERTES CON LLUVIAS INTENSAS.
27 de Octubre a las 01:37. Localidad: San Justo, Cba. DEA: 258	00:08 TORMENTAS SEVERAS CON RAFAGAS Y OCASIONAL CAIDA DE GRANIZO.
3 de Noviembre a las 02:58. Localidad: Vera, Sta. Fé. DEA: 102	No se encontro información al respecto.
16 de Diciembre a las 20:14. Localidad: Marcos Juarez. DEA: 1485	20:02 TORMENTAS FUERTES CON RAFAGAS Y OCASIONAL CAIDA DE GRANIZO. 20:22 TORMENTAS SEVERAS CON RAFAGAS Y CAIDA DE GRANIZO. http://www.redpanorama.com.ar/alerta-tormentas-fuertes-ventos/ .

Tabla 3.3: Comparación entre las mayores descargas por mes durante el 2017, y los eventos registrados para dichas fechas y región.

3.4.3. Análisis Areal

La siguiente variable a analizar será el área de descarga del Cluster Severo. Empezaremos con una descripción univariada de la misma. Cuando se le realiza el histograma, vemos que se marca una tendencia logarítmica. De forma tal de apreciar mejor los rasgos, efectuamos una transformación logarítmica. Analizando las Figuras 3.16 3.17 y la tabla 3.4 encontramos que los datos transformados responden a un comportamiento del tipo "gaussiano". Centrando en la media de los datos transformados, podemos obtener que aproximadamente el 95% de los datos toma valores entre $9.55Km^2$ y $6025,6Km^2$.

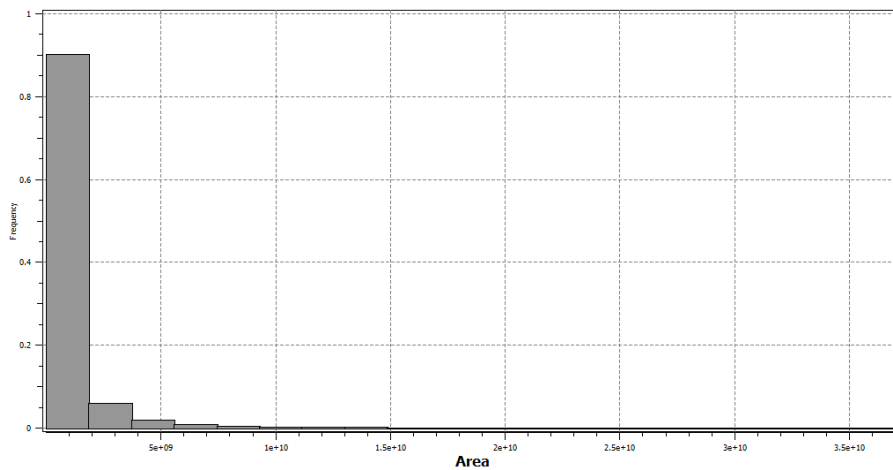


Figura 3.16: Histograma del Área en metros cuadrados.

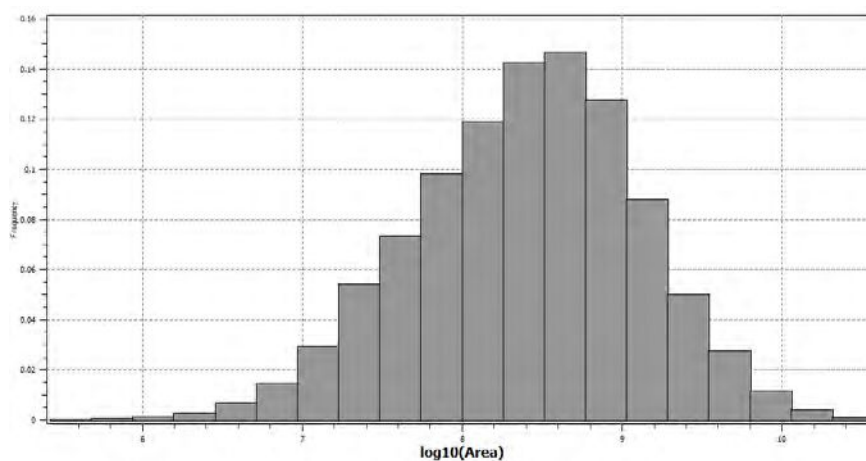


Figura 3.17: Histograma de la transformación logarítmica del Área.

Estadísticos Resumen del Área (km²) y de su transformación logarítmica.		
Media	790	8.38
Desvio Estandar	1.7e ⁶	0.7
Máximo	37000	10.57
Mínimo	0.26	5.4
Cuartil 1 (75%)	760	8.88
Mediana	270	8.43
Cuartil 3 (25%)	84	7.92
Rango Intercuartil	676	0.96

Tabla 3.4: Estadísticos resumen del área y de su transformación logarítmica.

Continuaremos con un análisis bivariado entre el área y la cantidad de rayos, para lo cual estimaremos el coeficiente de correlación lineal, ρ , entre ambos aspectos. Recordemos que este valor mide el grado de correlación lineal existente entre dos variables cuantitativas. Dados dos variables aleatorias X e Y , se define la covarianza entre ambas como

$$Cov(X, Y) = E((X - E(X))(Y - E(Y))) \quad (3.1)$$

siendo E un operador que definimos como el valor esperado de las variables aleatorias. De forma de obtener un valor adimensional y acotado, se estandariza el mismo dividiendo por los desvíos estándares, teniendo así

$$\rho_{XY} = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{V(X)}\sqrt{V(Y)}} \quad (3.2)$$

siendo V la varianza de la variable aleatoria.

En general, se suele estimar ρ_{XY} a partir de los datos $(X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n)$ a través de la siguiente fórmula:

$$\hat{\rho}_{XY} = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{s_X s_Y} \quad (3.3)$$

siendo \bar{X} e \bar{Y} los promedios muestrales de X_i e Y_i respectivamente, usados como estimadores de $E(X)$ y $E(Y)$. s_X y s_Y son los estimadores usualmente utilizados para los devíos estándares de X y de Y .

Tal como fuese mencionado, tanto ρ_{XY} como su estimador son valores adimensionales comprendidos entre -1 y 1. En el caso de variables X e Y independientes, se puede probar que $\rho_{XY} = 0$. En cambio si toma el valor -1 o 1 tendremos entonces dependencia lineal perfecta. Es decir, existen a y b tales que $Y = aX + b$. En este trabajo consideraremos como X al área del cluster severo e Y a la cantidad de rayos que lo forman.

En el análisis bivariado se decidió trabajar con diagramas de dispersión debido a que permiten apreciar la tendencia existente entre ambas variables y es posible visualizar outliers, es decir, valores atípicos que no responden al comportamiento general de la población. Observando la figura 3.18 tenemos una relativamente alta correlación de 0.84, con cierta presencia de valores atípicos. La eliminación

de estos valores permite obtener un diagrama de dispersión (figura 3.19) de donde se observa de igual forma una tendencia entre ambas aunque con bastante dispersión. La tendencia es más evidente en los casos de áreas y cantidad de rayos conservados.

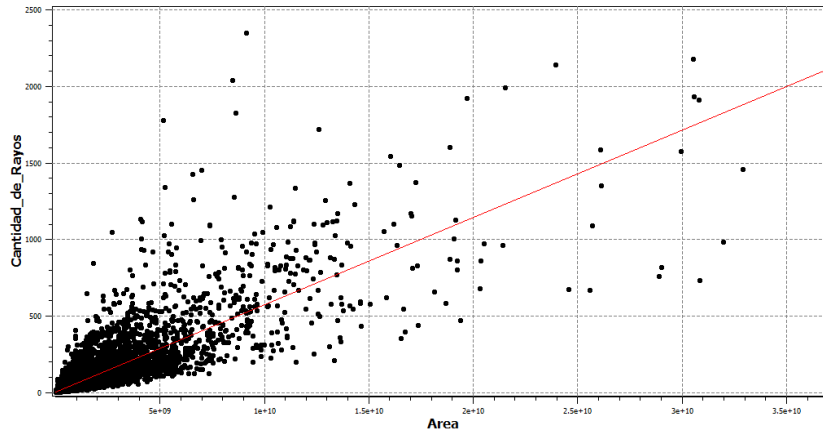


Figura 3.18: Diagrama de dispersión entre el área y la cantidad de rayos.

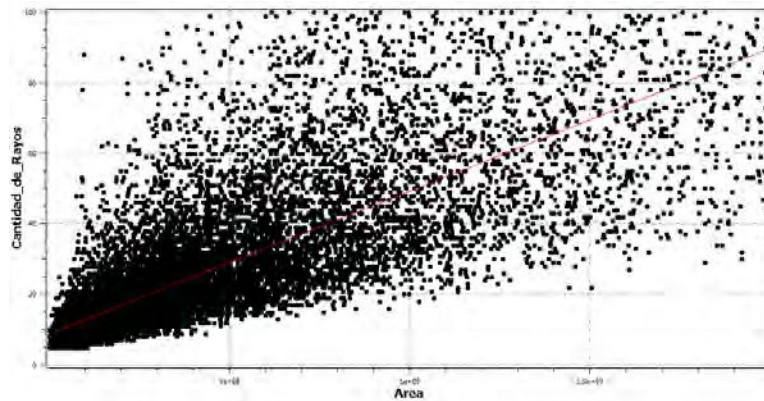


Figura 3.19: Diagrama de dispersión entre el área y la cantidad de rayos centrado en las medias de ambas variables.

Como último se le realizó un diagrama de boxplot (Fig. 3.20), donde se observan bastantes outliers con lo que podemos decir que el área por jump se mantiene conservado, con una tendencia general a estar en áreas menores a $1000km^2$.

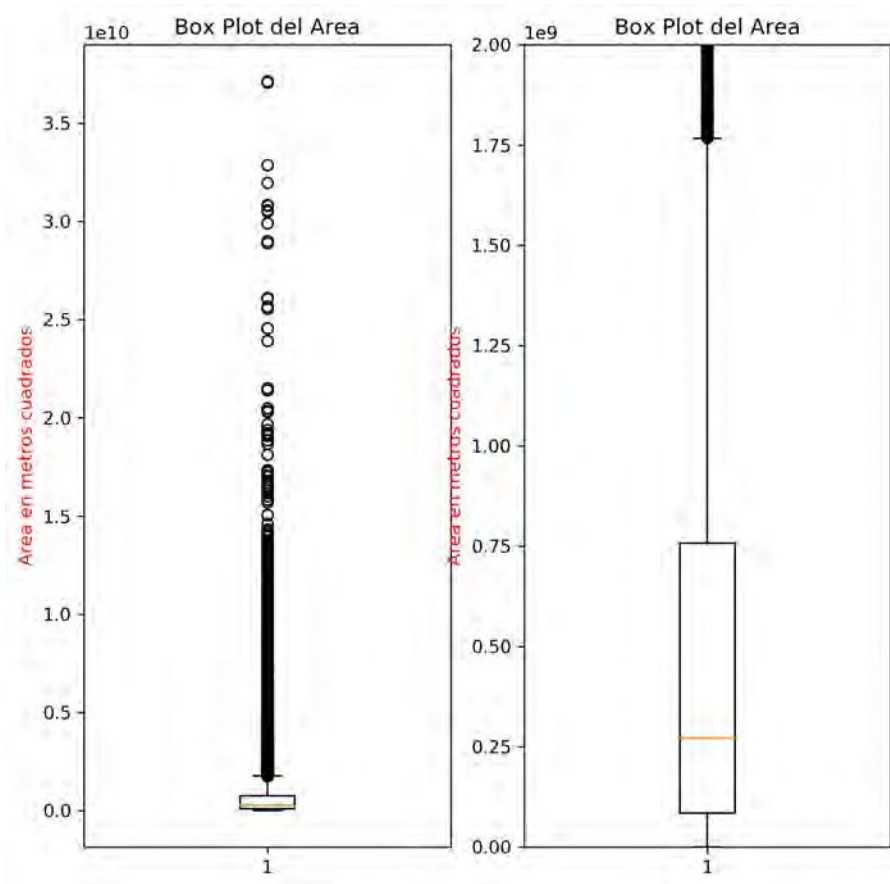


Figura 3.20: Diagrama de Boxplot del Área.

3.4.4. Umbral del Cluster Severo

En este trabajo, el umbral de la tormenta se define como aquel valor a partir del cual GeoRayos clasifica a un cluster como disperso o denso, siendo en el último caso severo cuando se evidencia un jump. Este umbral fue establecido en cinco rayos cada dos minutos en base al estudio de Nicora y otros 2015 [23]. Analizaremos la distribución de los datos correspondientes a la última etapa de Schultz, es decir con las descargas de los últimos dos minutos, en los cuales se evidenció un jump.

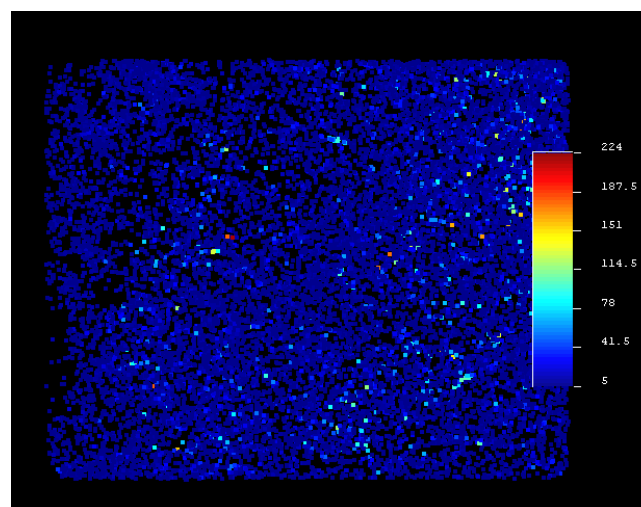


Figura 3.21: Distribución espacial de los datos en función del Umbral, realizado con el programa SGeMs

En primer lugar, con la ayuda del programa SGeMs distribuiremos los datos espacialmente, en donde el color representa la cantidad de rayos detectados en los últimos dos minutos. A través de un análisis visual (Figura 3.21) vemos que, en general predomina el color azul, es decir los valores menores a 41 descargas. En la tabla 3.5 se muestran los estadísticos resumen de esta variable en su forma original y con una transformación logarítmica. En la figura 3.22 mostramos un histograma de los datos originales y los mismos con la transformación logarítmica en la Figura 3.23. Se evidencia una asimetría a derecha en la distribución de los datos, que permanece en la transformación, lo cual permitiría descartar una hipótesis de normalidad o log-normalidad en la distribución de los datos.

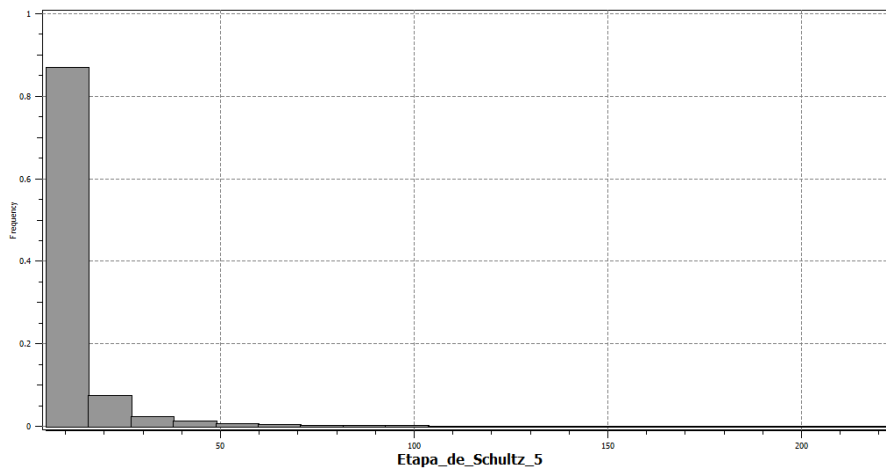


Figura 3.22: Histograma del Umbral.

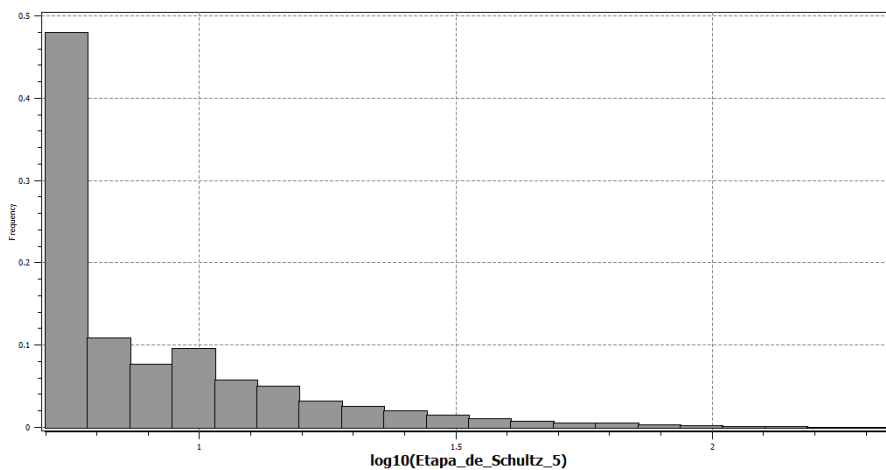


Figura 3.23: Histograma de la transformación logarítmica del Umbral.

Estadísticos Resumen del Umbral y de su transformación logarítmica.		
Media	<i>10.42</i>	<i>0.9</i>
Desvio Estandar	<i>12.03</i>	<i>0.24</i>
Máximo	<i>224</i>	<i>2.35</i>
Mínimo	<i>5</i>	<i>0.698</i>
Cuartil 1 (75 %)	<i>10</i>	<i>1</i>
Mediana	<i>7</i>	<i>0.84</i>
Cuartil 3 (25 %)	<i>5</i>	<i>0.698</i>
Rango Intercuartil	<i>5</i>	<i>0.302</i>

Tabla 3.5: Estadísticos Resumen del Umbral y de su transformación logarítmica.

El estudio exploratorio permite concluir una presencia importante de datos entre los valores 7 y 10, lo cual marca una posible diferencia con el umbral empíricamente establecido por Nicora y otros 2015 [23]. Cabe preguntarse entonces si es necesario un incremento en el punto de corte de forma tal de poder reducir presencia de falsos positivos en los jumps y, por ende, implementar una modificación en el algoritmo GeoRayos. Está fuera del alcance de esta tesis la caracterización climatológica completa del fenómeno de los jumps asociada con la severidad meteorológica, algo que requeriría una cantidad mayor de datos históricos, pero se abre así una línea metodológica de estudio para posibles trabajos futuros.

3.4.5. Análisis de las Etapas de Schultz.

En esta sección nos preguntaremos si todos los tipos de Jumps involucrarían severidad. Para realizar este análisis, se dividió al dato en dos grupos:

1. Aquellos Jumps en donde en sus primeras etapas de Schultz no tenemos actividad eléctrica, subsección 3.4.5.1.
2. Aquellos Jumps con actividad eléctrica en todas su etapas, subsección 3.4.5.2.

Esta división se realiza porque en el primer caso, estos jumps representan situaciones relacionadas con un inicio de actividad eléctrica; y en el segundo de los casos, representa jumps dentro de un sistema con AEA iniciada en su etapa madura. A los primeros los asociaremos con el inicio de la convección, es decir supondremos que preceden a un evento severo. A los segundos los asociaremos con el desarrollo del tiempo severo, es decir supondremos que ceden a estos. A ambos grupos le realizaremos un análisis exploratorio para determinar los parámetros que los describen y luego los representaremos en un mapa para estudiar su distribución espacial. En el caso del primer grupo se espera tener más actividad durante la noche porque para esas horas tenemos el inicio de convección.

3.4.5.1. Jumps sin Actividad eléctrica en sus primeras etapas de Schultz.

Comenzaremos dividiendo este grupo en tres subgrupos:

1. Tres ceros: Llamaremos de esta manera, a aquellos Jumps con sus tres primeras etapas de Schultz sin AEA.

2. Cuatros ceros: Denominaremos de esta forma, a aquellos Jumps con sus cuatro primeras etapas sin AEA.

3. Cinco Ceros: serán aquellos Jumps con sus cinco primeras etapas sin AEA.

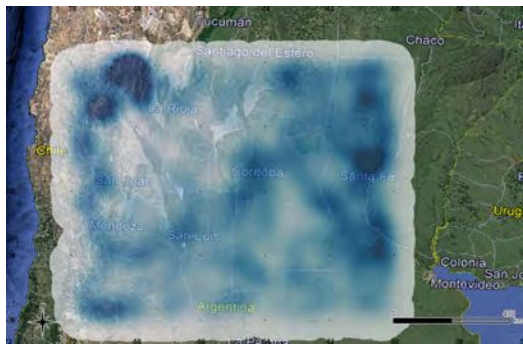
A cada uno de ellos, le realizaremos un análisis exploratorio, y los representaremos en un mapa, de tal manera de estudiar su distribución espacial. También estudiaremos su ciclo diario y la representación del mismo en mapas.

En la Tabla 3.6 presentamos los estadísticos resumen de las etapas de Schultz, obteniendo una media en general para los tres casos de: 0/0/0/0.27/0.39/5.8 y un desvío de: 0/0/0/0.21/0.58/1.31.

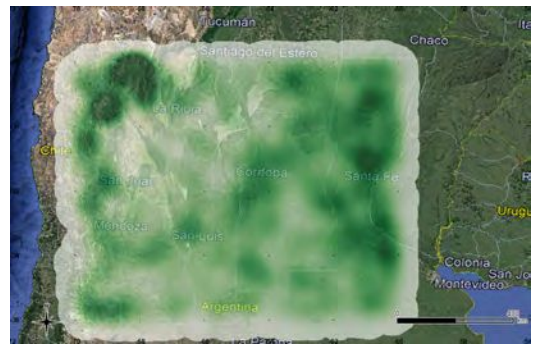
<i>Estadísticos Resumen de las Etapas de Schultz de los Jumps del:</i>			
	Grupo tres ceros.	Grupo Cuatro ceros	Grupo cinco ceros
Datos	5637	4155	2741
Media	0/0/0/0.34/0.67/5.93	0/0/0/0/0.49/5.79	0/0/0/0/0/5.69
Desvío Estandar	0/0/0/0.65/0.95/1.5	0/0/0/0/0.78/1.27	0/0/0/0/0/1.16
Máximo	0/0/0/7/8/28	0/0/0/0/5/18	0/0/0/0/0/18
Mínimo	0/0/0/0/0/5	0/0/0/0/0/5	0/0/0/0/0/5
Cuartil 1 (75 %)	0/0/0/1/1/6	0/0/0/0/1/6	0/0/0/0/0/6
Mediana	0/0/0/0/0/5	0/0/0/0/0/5	0/0/0/0/0/5
Cuartil 3 (25 %)	0/0/0/0/0/5	0/0/0/0/0/5	0/0/0/0/0/5
Rango Intercuartil	0/0/0/1/1/1	0/0/0/0/1/6	0/0/0/0/0/1

Tabla 3.6: Estadísticos resumen de la Etapas de Schultz para tres, cuatro y cinco ceros.

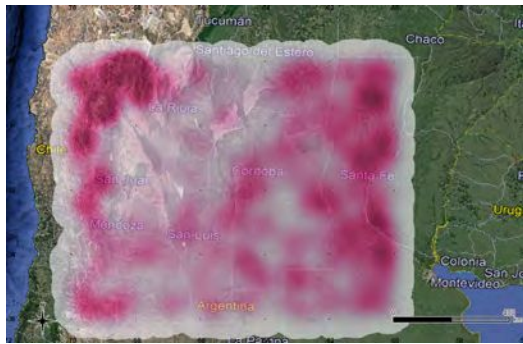
Continuando con el estudio de su distribución espacial, tenemos, por una parte los mapas 3.24 de los que se observa en los tres casos una importante concentración de estos al noroeste de la zona de estudio y en menor medida en la provincia de Santa Fé, de estos tres grupos, nos quedaremos con el grupo cinco ceros debido a que representan más claramente aquellos Jumps en los que a los doce minutos anteriores no se observan AEA en la zona; y por la otra, los mapas 3.25 y 3.26 que muestran la distribución espacial de estos datos a medida que avanzan las horas. De estos últimos, lo importante se encuentra en observar como a medida que avanzan las horas, los jumps se van trasladando de la zona oeste de Argentina al Este, empezando entre las 0-3 am en la zona central de la región de estudio, dirigiéndose a la zona este, luego concentrándose al noreste. En las horas de la tarde, a partir de las 15 horas, tenemos una concentración al oeste de la región de estudio, manteniéndose en dicha zona hasta las 21 horas aproximadamente.



(a) Mapa de calor del grupo tres ceros.

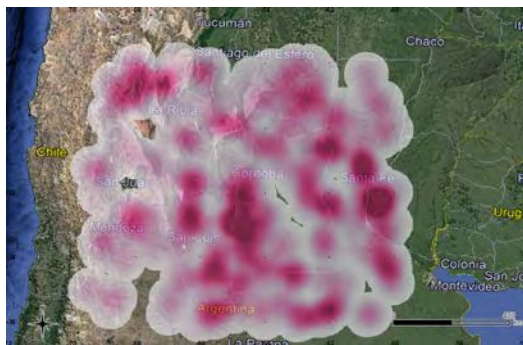


(b) Mapa de calor del grupo cuatros ceros.

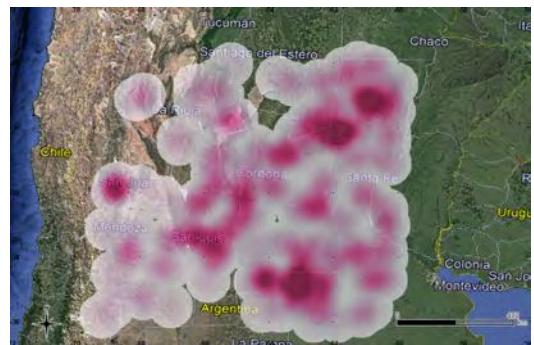


(c) Mapa de calor del grupo cinco ceros.

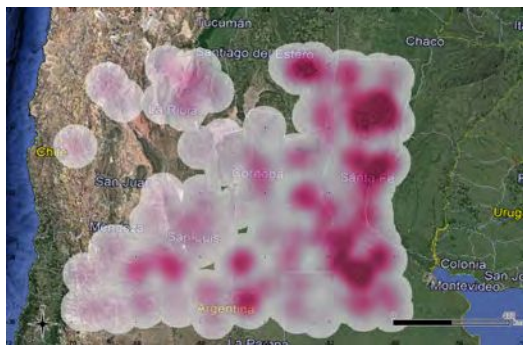
Figura 3.24: Mapas de calor de los Jumps sin AEA en sus primeras etapas.



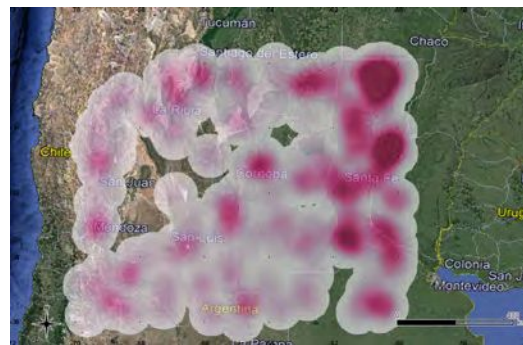
(a) Mapa de Calor de los datos desde las 00 a las 03 de la mañana.



(b) Mapa de Calor de los datos desde las 03 a las 06 de la mañana.

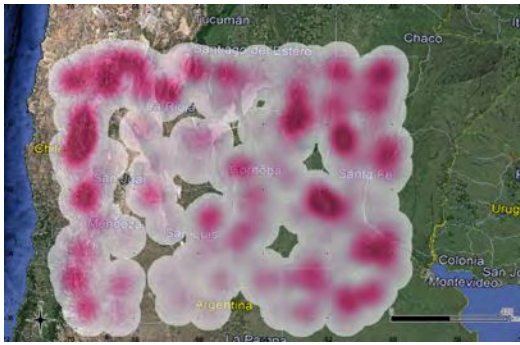


(c) Mapa de Calor de los datos desde las 06 a las 09 de la mañana.

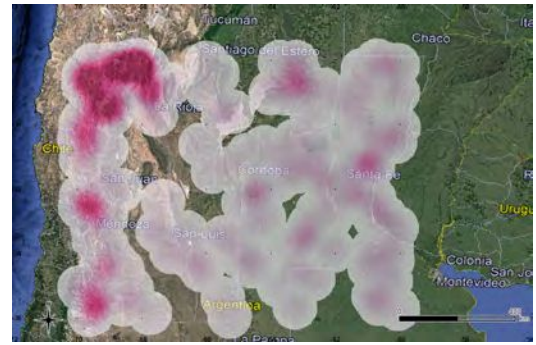


(d) Mapa de Calor de los datos desde las 09 a las 12 de la mañana.

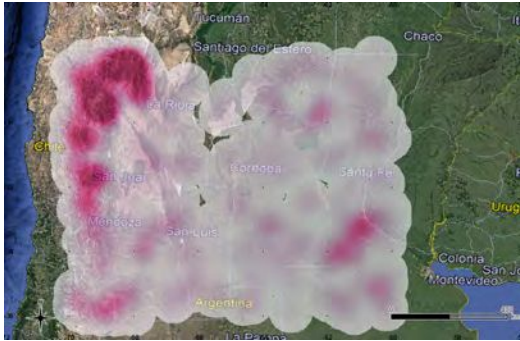
Figura 3.25: Evolución temporal de los datos del grupo cinco ceros.



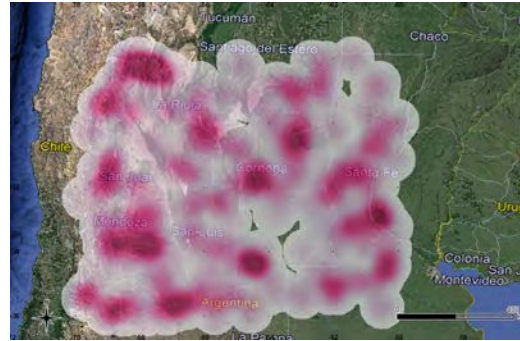
(a) Mapa de Calor de los datos desde las 12 a las 15 de la tarde.



(b) Mapa de Calor de los datos desde las 15 a las 18 de la tarde.



(c) Mapa de Calor de los datos desde las 18 a las 21 de la noche.



(d) Mapa de Calor de los datos desde las 21 a las 24 de la noche.

Figura 3.26: Evolución temporal de los datos del grupo cinco ceros.

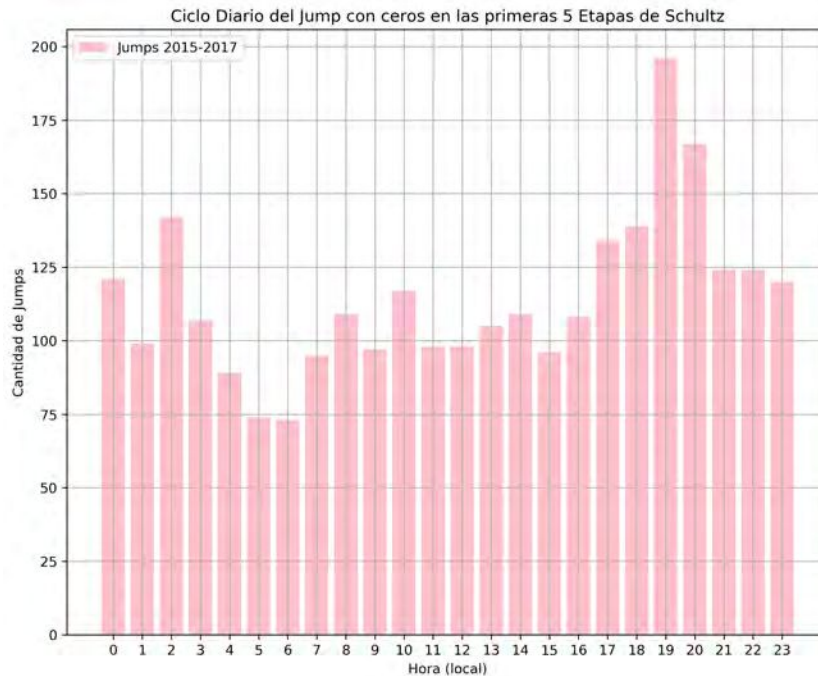


Figura 3.27: Ciclo diario de los Jumps para el grupo cinco ceros.

Por último estudiando su ciclo diario (Figura 3.27) encontramos una mayor frecuencia de este tipo de Jump para las 19:00 horas, que si observamos en los mapas 3.25 y 3.26, corresponde a la zona Noroeste de la región de estudio. Observando este ciclo, vemos que el aumento de AEA se da a partir de las 17:00 horas hasta las 20:00, luego se mantiene bastante hasta las 02:00 am cuando se produce

otro pico en la frecuencia de estos Jumps disminuyendo para las 06:00 am.

3.4.5.2. Jumps con Actividad eléctrica en todas sus etapas de Schultz

Comenzaremos realizándole un análisis exploratorio, del que obtenemos la tabla 3.7, de este estadístico resumen obtenemos que en general su media es: 6.59/7.6/8.36/9.09/9.71/18.32 y su desvío: 11.45/12.24/12.91/13.44/13.97/18.51

<i>Estadísticos Resumen de las Etapas de Schultz de los Jumps con AEA en todas su etapas.</i>	
Datos	6708
Media	6.59/7.6/8.36/9.09/9.71/18.32
Desvío Estandar	11.45/12.24/12.91/13.44/13.97/18.51
Máximo	177/171/165/157/154/224
Mínimo	1/1/1/1/1/5
Cuartil 1 (75 %)	6/8/9/9/11/21
Mediana	3/4/4/5/5/12
Cuartil 3 (25 %)	1/2/2/3/3/8
Rango Intercuartil	5/6/7/6/8/13

Tabla 3.7: Estadísticos resumen de las Etapas de Schultz con AEA en todas ellas.

Proseguiremos con el estudio de su distribución espacial. Al igual que en la sección 3.4.5.1 tenemos por una lado el mapa 3.28, del que vemos que este tipo de dato tiende a concentrarse al Noreste de la región de estudio; y por el otro tenemos los mapas 3.29 y 3.30 que muestran como es la distribución espacial de los mismos en función de las horas. Analizando estos últimos, tenemos entre las 00:00-03:00 am una importante concentración en la zona de Mendoza, de 03:00-09:00 am los datos se van dispersando cada vez más, dirigiéndose hacia la zona noreste de la región de estudio entre las 12:00 y 15:00 pm. A medida que avanza la tarde estos jumps se dispersan por esta zona. Entre las 18:00-24:00 volvemos a tener actividad en la zona suroeste.

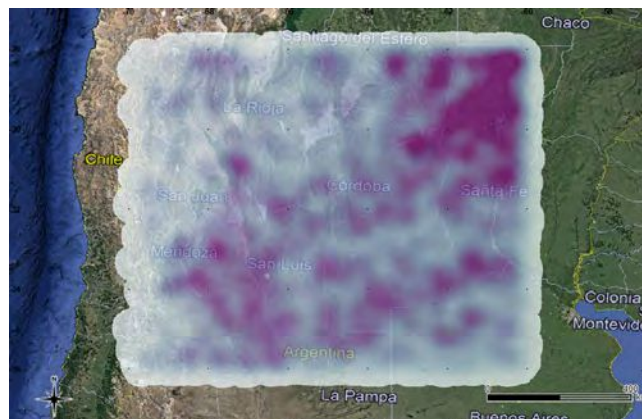
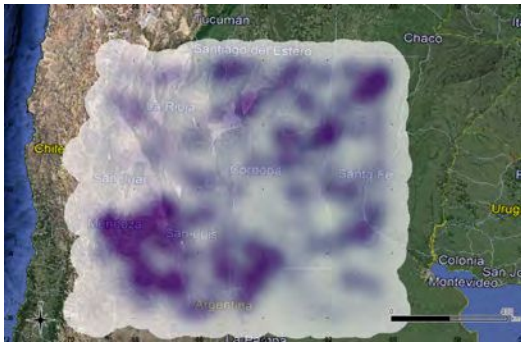
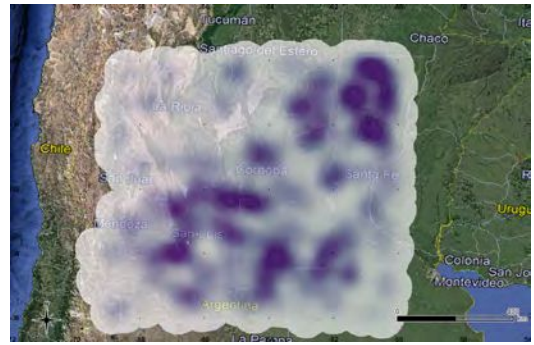


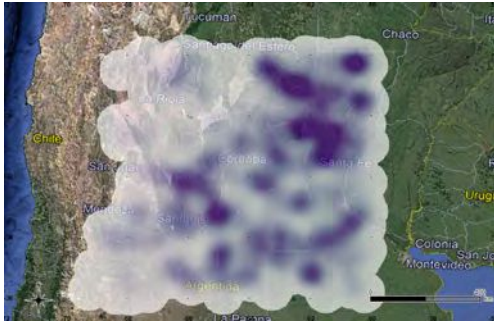
Figura 3.28: Mapa de Calor de aquellos Jumps con AEA en todas sus etapas.



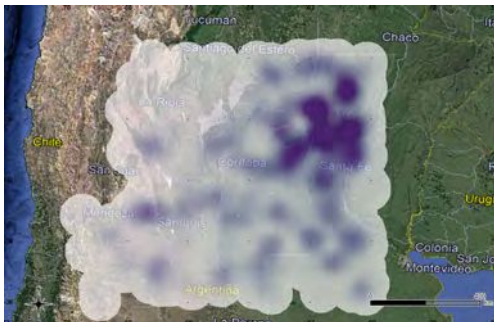
(a) Mapa de Calor de los datos desde las 00 a las 03 de la mañana.



(b) Mapa de Calor de los datos desde las 03 a las 06 de la mañana..

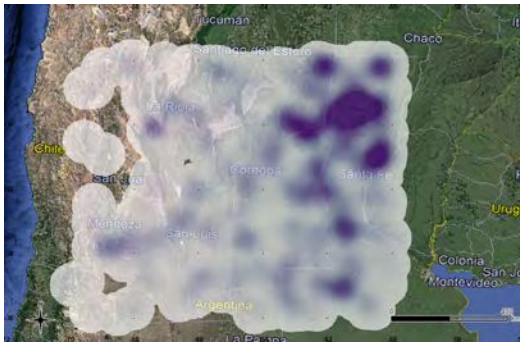


(c) Mapa de Calor de los datos desde las 06 a las 09 de la mañana.

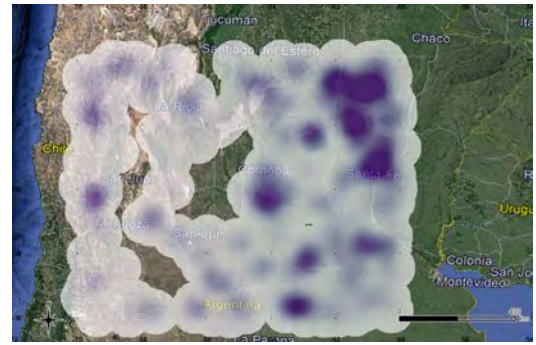


(d) Mapa de Calor de los datos desde las 09 a las 12 de la mañana.

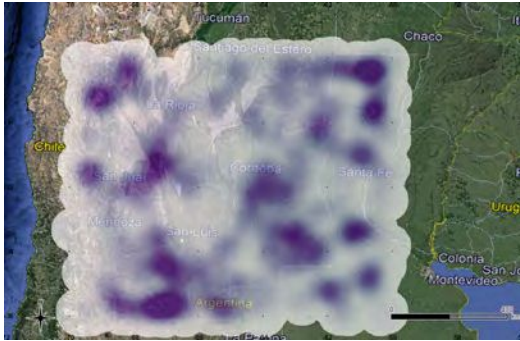
Figura 3.29: Evolución temporal de los datos de aquellos Jumps con AEA en todas sus etapas de Schultz.



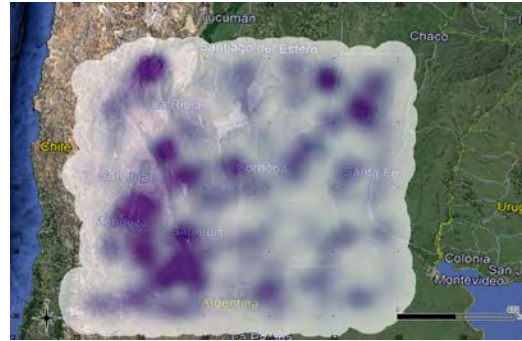
(a) Mapa de Calor de los datos desde las 12 a las 15 de la tarde.



(b) Mapa de Calor de los datos desde las 15 a las 18 de la tarde.



(c) Mapa de Calor de los datos desde las 18 a las 21 de la noche.



(d) Mapa de Calor de los datos desde las 21 a las 24 de la noche.

Figura 3.30: Evolución temporal de los datos de aquellos Jumps con AEA en todas sus etapas de Schultz.

Continuaremos, con el estudio del ciclo diario de estos Jumps. Observando la Figura 3.31 encontramos mayor frecuencia de Jumps entre las 22:00 y las 02:00 am que corresponde a la zona de Mendoza según lo visto en los mapas 3.30, disminuyendo durante el día hasta llegar a las 15:00 horas donde tenemos el mínimo en la frecuencia de estos Jumps.

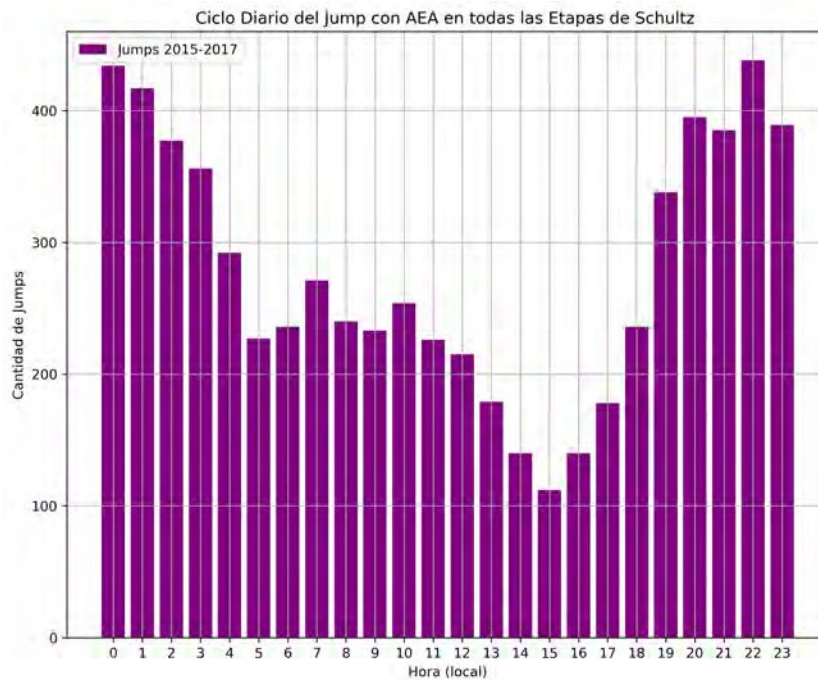


Figura 3.31: Ciclo diario de los Jumps.

3.4.5.3. Comparación entre ambos grupos

Cuando comenzamos con este estudio, una de las preguntas que nos realizamos fue si los Jumps sin AEA previa se podrían tomar como proxies de Eventos severos o habría que descartarlos. A tal fin, realizamos los estudios en las secciones previas 3.4.5.1 y 3.4.5.2. Al comparar los ciclos diarios de todos los datos 3.4 y de estos dos grupos 3.27 y 3.31 encontramos que el comportamiento entre estos tres es bastante similar, pero en especial se observa un comportamiento bastante parecido entre todos los datos y aquellos jumps con AEA en todas sus etapas.

A este punto de la tesis no creemos poder responder nuestra pregunta por la poca cantidad de datos involucrados en este análisis, pero a priori visualizando los mapas 3.25, 3.26, 3.29 y 3.30 se observan patrones muy diferentes espacialmente. En los jumps sin actividad eléctrica atmosférica en las primeras etapas, se observa actividad sobre la cordillera que no se representa de la misma manera en el otro grupo de Jumps, puntualizado más para este último grupo en la zona de La Rioja. Creemos que este es uno de los temas que deberíamos seguir investigando porque creemos que esta diferencia está asociada a la microfísica de las descargas en las diferentes etapas.

3.4.6. Topografía

En esta sección investigaremos si existe alguna relación entre la distribución espacial de los Jumps y la Topografía. Para ello se eligieron a través del análisis visual de los datos del mapa 3.2b las tres zonas con mayor frecuencia de Jumps que representan tres situaciones diferentes.

- La Rioja entre las latitudes $[-27.85^{\circ}; -30.19^{\circ}]$ y longitudes $[-70.14^{\circ}; -65.81^{\circ}]$, la cual representa a los Jumps sin AEA en sus primeras etapas. Esta zona nos llama la atención especialmente porque se vislumbra desde las 12 del mediodía hasta las 03 de la mañana del día siguiente. (Ver mapas 3.25 y 3.26).
- Córdoba entre las latitudes $[-29.795^{\circ}; -33.10^{\circ}]$ y longitudes $[-66.01^{\circ}; -62.81^{\circ}]$. Al igual que La Rioja representa a los jumps sin AEA en sus primeras etapas, en especial representa a los jumps del grupo cinco ceros.
- Santa Fé entre las latitudes $[-27.83^{\circ}; -32.19^{\circ}]$ y longitudes $[-64.01^{\circ}; -59.86^{\circ}]$. Conocida como una de las zonas asociadas a grandes sistemas de Mesosescalas, por lo que son regiones más propensas a desarrollo de tiempo severo.

Se realizó un análisis estadístico local de cada zona y se estudio su relación con la topografía. Para el estudio local, se llevo a cabo un estadístico resumen (Tabla 3.8) de cada una de las zonas para las variables área y cantidad de rayos, con lo que se obtuvo una mayor media en los valores del área y cantidad de rayos para la ciudad de Santa Fé, y una menor para La Rioja.

	<i>La Rioja</i>		<i>Córdoba</i>		<i>Santa Fé</i>	
	<i>Área (Km²)</i>	<i>Cantidad de Rayos</i>	<i>Área(Km²)</i>	<i>Cantidad de Rayos</i>	<i>Área (Km²)</i>	<i>Cantidad de Rayos</i>
<i>Datos</i>		2342	1883		5611	
<i>Media</i>	320	28.5	750	48	980	66.95
<i>Desviación Estandar</i>	541.347	51.26	1542.59	108.24	2243.12	156.4
<i>Máximo</i>	5200	1050	28800	2042	3700	2350
<i>Mínimo</i>	0.37	5	0.4	5	0.458344	5
<i>Cuartil 1 (75 %)</i>	370	29	73800	44	920	55
<i>Mediana</i>	129	14	309	20	321	21
<i>Cuartil 3 (25 %)</i>	40.3	8	99.2	10	94.9	10
<i>Rango intercuartil</i>	329.7	21	73700.8	34	825.1	45

Tabla 3.8: Estadísticos resumen que describen el comportamiento de las variables Áreas y Cantidad de Rayos para las Ciudades de La Rioja, Córdoba y Santa Fé.

Para continuar, analizaremos la relación de estas tres zonas con la topografía. En las zonas con mayor frecuencia de Jumps, se trazaron dos transectas, una en la dirección Norte- Sur y otra en la dirección Este-Oeste. En los gráficos 3.32, 3.33, 3.34, 3.35, 3.36 y 3.37 encontraremos arriba un mapa con la topografía, con los Jumps y una recta roja que muestra donde se realizaron las transectas para obtener los perfiles ubicados abajo de este mapa. El punto rojo sobre la transecta representa el lugar con más frecuencia de Jumps. En los gráficos tenemos las transectas con información topográfica y los perfiles con el dato de los Jumps interpolados, lo que permitió obtener las siguientes conclusiones:

- En La Rioja tenemos un aumento en la concentración de Jumps para las laderas de las montañas, donde la topografía comienza a descender luego de haber alcanzado su máximo. En el perfil Norte-Sur los Jumps alcanzan su máxima frecuencia para alturas mayores a los 2500 metros aproximadamente y en la dirección Oeste-Este para alturas superiores a 4000 metros. El pico máximo en la frecuencia de Jumps anda alrededor de los 60. Esta zona representa a los jumps sin AEA en sus primeras etapas, la cual se encuentra asociada a las primeras etapas de actividad eléctrica en una Tormenta. El máximo muy marcado se encuentra en la zona de Vinchina, La Rioja. Esta zona llama la atención, debido a que es una región que se caracteriza por tener escasa precipitación.

- Para Córdoba, observamos el mismo comportamiento que en La Rioja, encontrando el máximo de frecuencia de Jumps para un altura aproximada de menos de 450 metros en la dirección Norte-Sur y menos de 500 metros de altura para la dirección Oeste-Este. Con un pico máximo en la frecuencia de Jumps de aproximadamente 24.5. En este caso la máxima frecuencia se da para la ciudad de Colón, Córdoba. Tanto en Córdoba como La Rioja la relación encontrada entre los Jumps y la topografía, concuerda con los trabajos presentados por Bürgesser y otros 2013[8], donde asocian la AEA con las laderas.

- En Santa Fé, al movernos en la dirección Norte-Sur vemos que la topografía y los jumps mantienen un comportamiento bastante parecido sin presentar máximos abruptos. En la dirección Oeste-Este tenemos el máximo en la frecuencia de Jumps para la zona llana de Santa Fé, que corresponde a la ciudad de Vera, Santa Fé. Con una frecuencia máxima de 50 Jumps.

La Rioja

Transecta -68.22° dirección Norte-Sur.

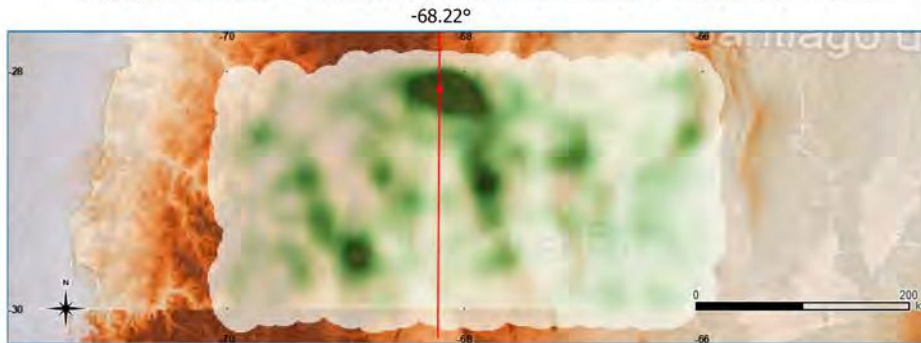


Fig.a: Jumps en la zona de la ciudad de La Rioja, con transecta en la dirección Norte Sur.

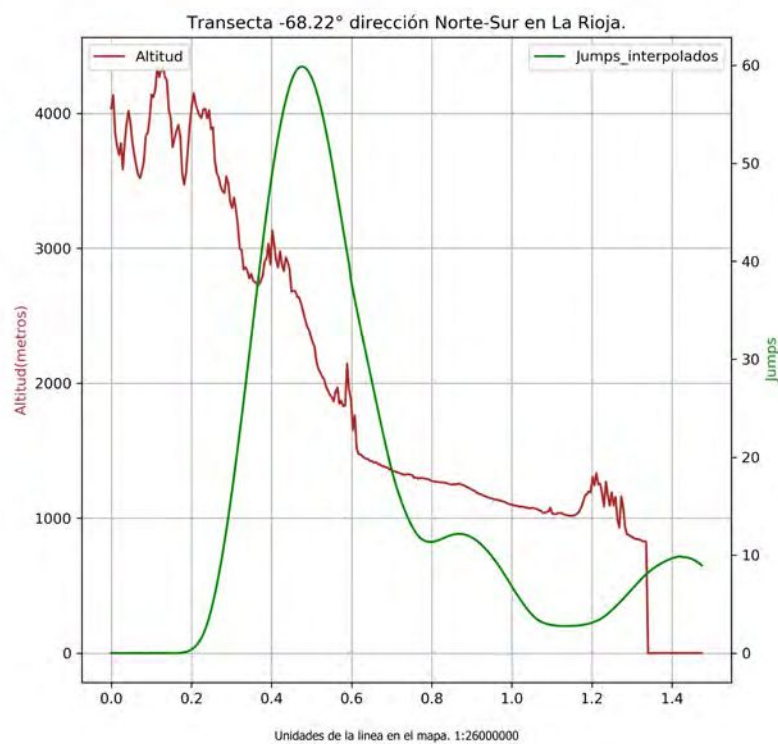


Figura 3.32: Datos de la zona definida entre las latitudes $[-27.85; -30.19]$ y longitudes $[-70.14; -65.81]$
 Arriba: Jumps en La Rioja, con transecta en la dirección Norte-Sur correspondiente a la longitud -
 68.22° . Abajo: Transecta Norte-Sur con información topográfica de la ciudad de La Rioja y perfil con
 Jumps interpolados.

La Rioja

Transecta -28.11° dirección Oeste-Este.

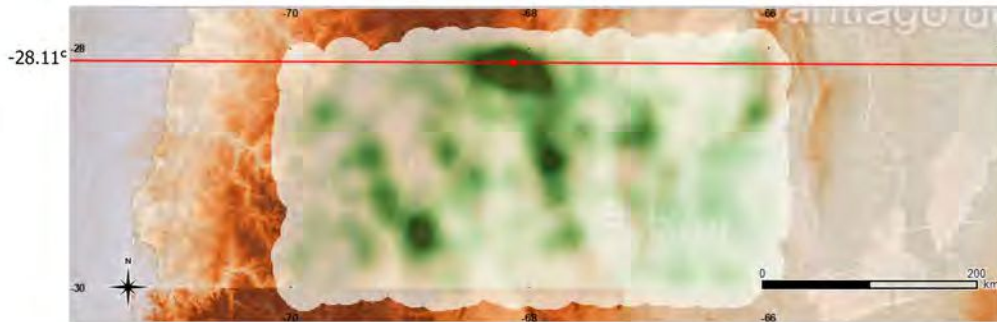


Fig.a: Jumps en la zona de la ciudad de La Rioja, con transecta en la dirección Oeste-Este.

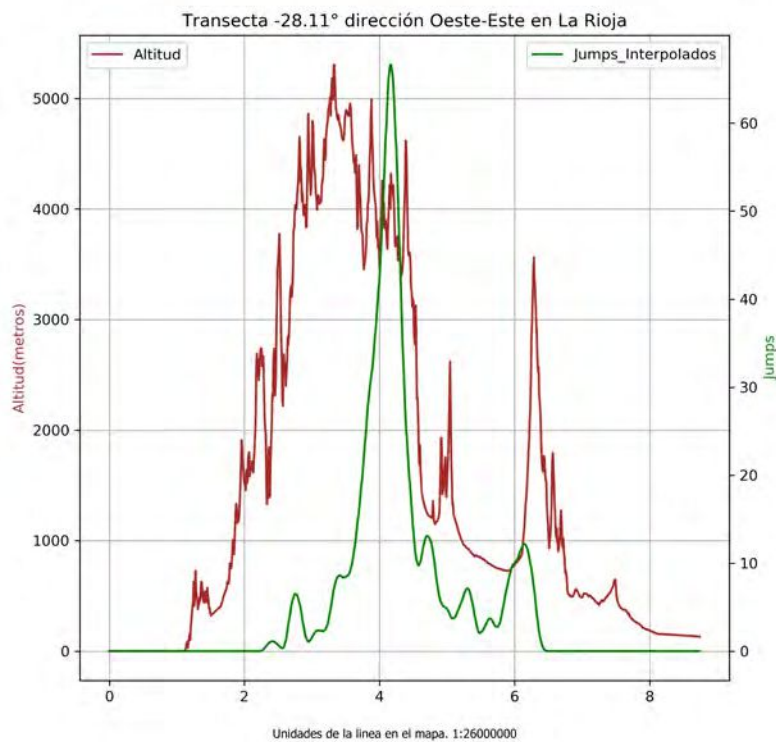


Figura 3.33: Datos de la zona definida entre las latitudes $[-27.85; -30.19]$ y longitudes $[-70.14; -65.81]$
 Arriba: Jumps en La Rioja, con transecta en la dirección Oeste-Este correspondiente a la latitud -28.11° .
 Abajo: Transecta Oeste-Este con información topográfica de la ciudad de La Rioja y perfil con Jumps interpolados.

Córdoba

Transecta -64.23° dirección Norte-Sur.

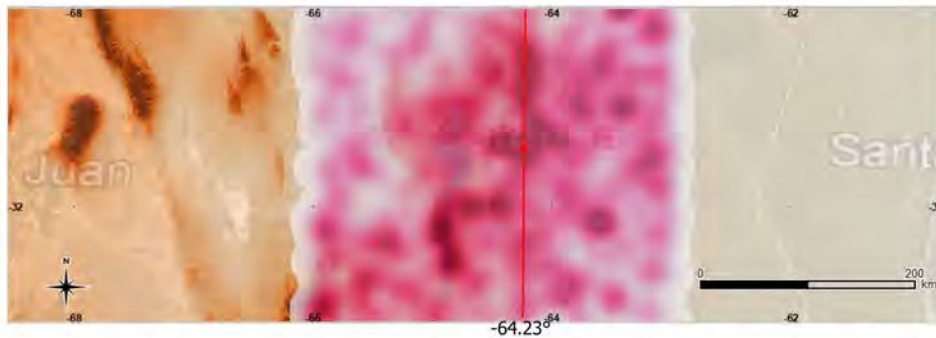


Fig.a: Jumps en la zona de la ciudad de Córdoba, con transecta en la dirección Norte-Sur.

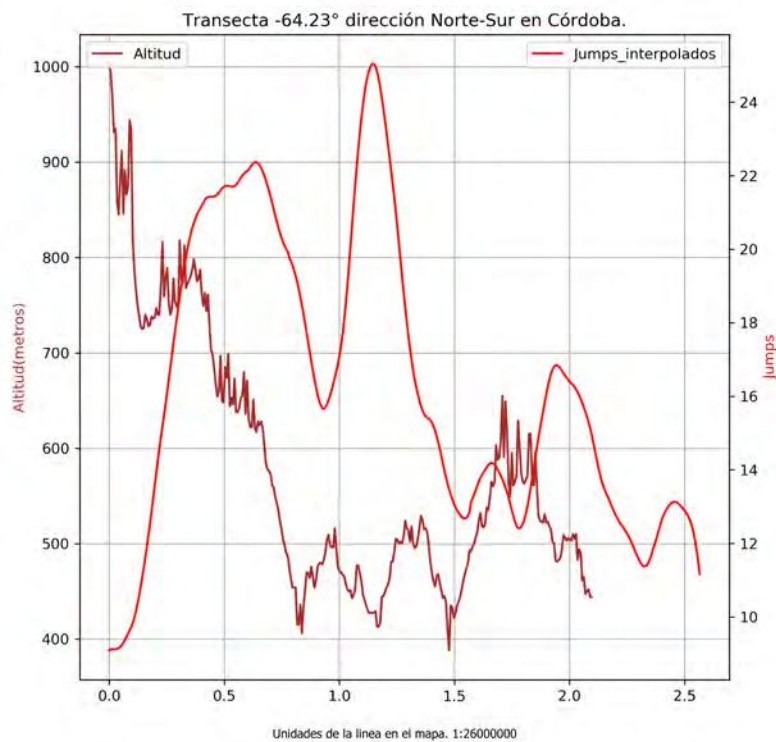


Figura 3.34: Datos de la zona definida entre las latitudes $[-29.795; -33.10]$ y longitudes $[-66.01; -62.81]$ Arriba: Jumps en Córdoba, con transecta en la dirección Norte-Sur correspondiente a la longitud -64.23° . abajo: Transecta Norte-Sur con información topográfica de la ciudad de Córdoba y perfil con Jumps interpolados.

Córdoba

Transecta -31.45° dirección Oeste-Este.

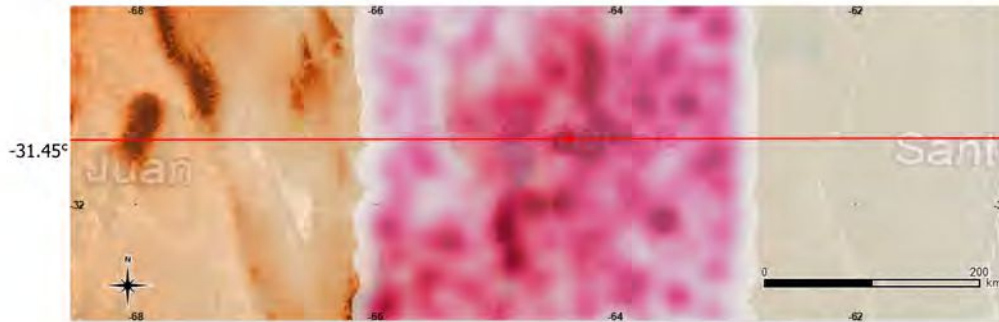


Fig.a: Jumps en la zona de la ciudad de Córdoba, con transecta en la dirección Oeste-Este.

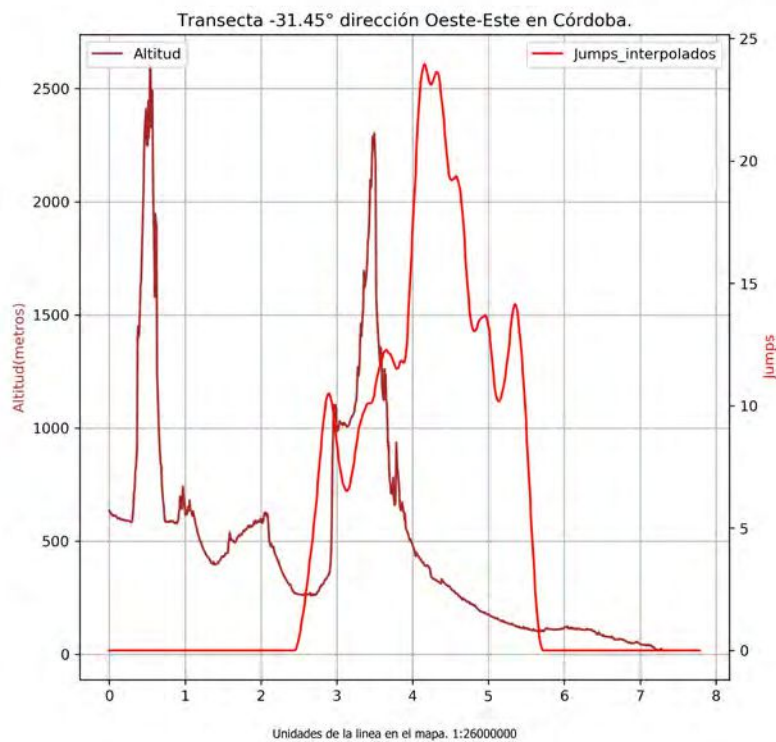


Figura 3.35: Datos de la zona definida entre las latitudes $[-29.795; -33.10]$ y longitudes $[-66.01; -62.81]$ Arriba: Jumps en Córdoba, con transecta en la dirección Oeste-Este correspondiente a la latitud -31.45° . Abajo: Transecta Oeste-Este con información topográfica de la ciudad de Córdoba y perfil con Jumps interpolados.

Santa Fé

Transecta -60.41° dirección Norte-Sur.

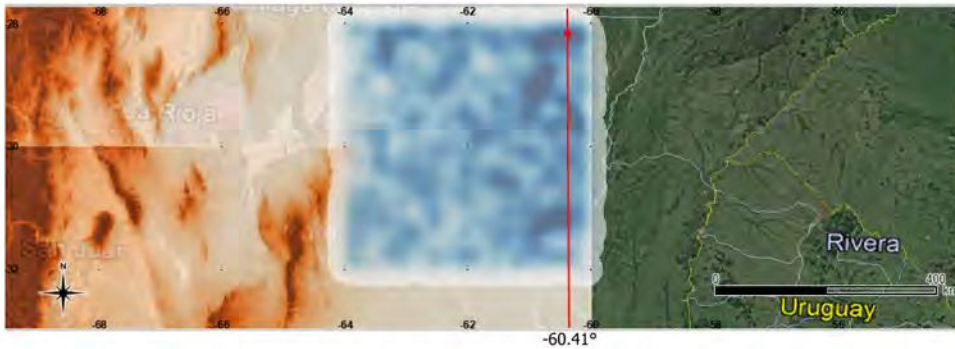


Fig.a: Jumps en la zona de la ciudad de Santa Fé, con transecta en la dirección Norte-Sur.

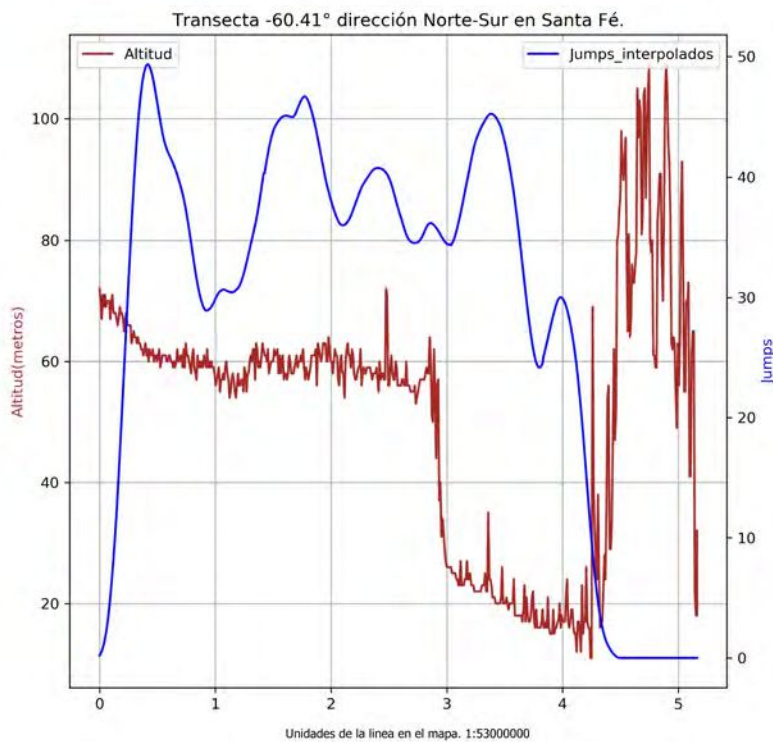


Figura 3.36: Datos de la zona definida entre latitudes $[-27.83; -32.19]$ y longitudes $[-64.01; -59.86]$. Arriba: Jumps en Santa Fé, con transecta en la dirección Norte-Sur correspondiente a la longitud -60.41° . Abajo: Transecta Norte-Sur con información topográfica de la ciudad de Santa Fé y perfil con Jumps interpolados.

Santa Fé

Transecta -28.19° dirección Oeste-Este.

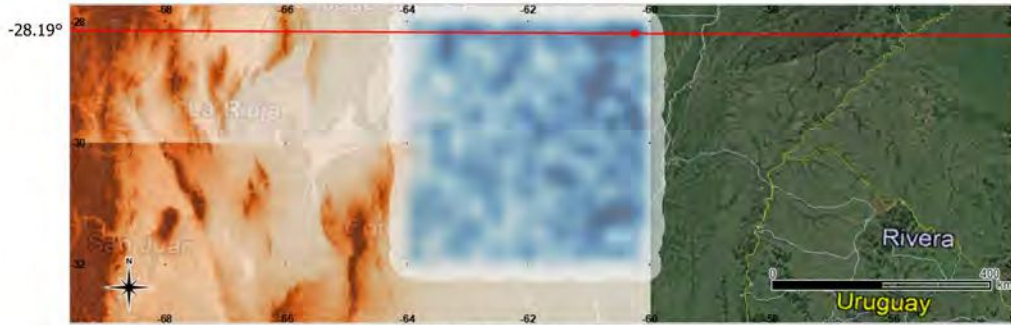


Fig.a: Jumps en la zona de la ciudad de Santa Fé, con transecta en la dirección Oeste-Este.

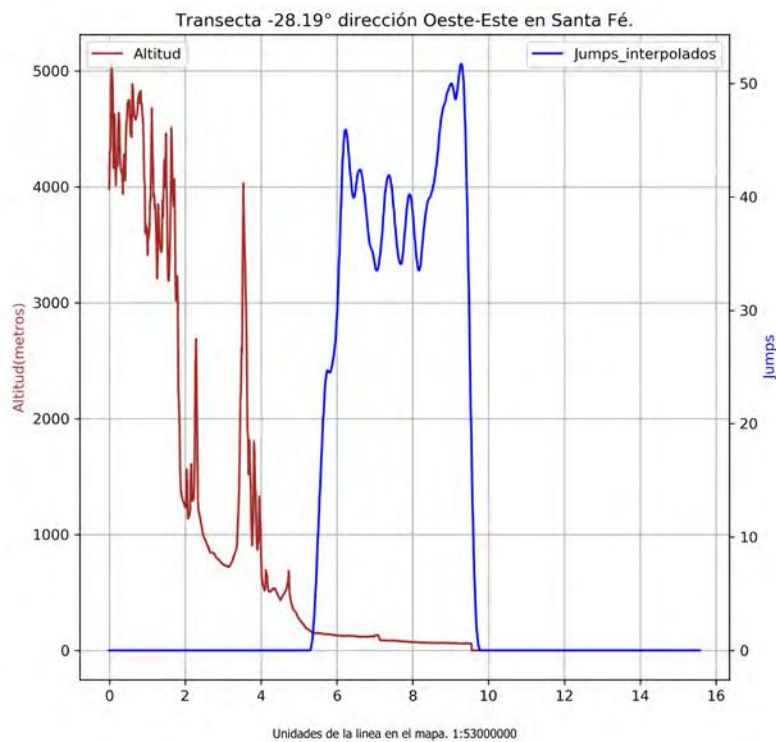


Figura 3.37: Datos de la zona definida entre latitudes $[-27.83; -32.19]$ y longitudes $[-64.01; -59.86]$. Arriba: Jumps en Santa Fé, con transecta en la dirección Oeste-Este correspondiente a la latitud -28.19° . Abajo: Transecta Oeste-Este con información topográfica de Santa Fé y perfil con Jumps interpolados latitudes.

3.5. Conclusión

De está caracterización obtuvimos los siguientes resultados:

- La mayor frecuencia de Jumps ocurre a las 20:00 horas, y la mínima a las 15:00.
- En verano tenemos la mayor actividad eléctrica atmosférica y en invierno la mínima. Con una media en cantidad de rayos de 52.53 descargas por cluster que generan Jumps.
- Las ciudades con más alto índice de Jumps son San Cristobal, General López, Verá, 9 de Julio, las cuales son ciudades de la Provincia de Santa Fé y San Justo de la provincia de Córdoba y por ende más propensas a desarrollar tiempo severo.
- Del análisis anual y mensual de la cantidad de rayos, obtuvimos que en general las mayores descargas eléctricas que generan Jumps suceden en horas de la madrugada, con mayor frecuencia en la zona noreste de la región de estudio. Además, encontramos que las ciudades donde ocurrieron estos eventos tienen un altitud promedio de 139 metros.
- La mayoría de los datos tienen cluster con áreas entre los $[9.55km^2, 6025.6km^2]$. Del análisis bivariado entre esta variable y la cantidad de rayos se observa de igual una tendencia entre ambas aunque con bastante dispersión.
- El umbral obtenido se encuentra entre 7 a 10 descargas eléctricas atmosféricas cada dos minutos, el cual difiere del umbral establecido en el trabajo de Nicora y otros 2015 [23].
- En relación al análisis de las Etapas de Schultz se dividió al Jump en dos grupos, uno sin AEA en sus primeras etapas y el otro con AEA en todas sus etapas, analizando ambos llegamos a la conclusión que tienen comportamientos muy diferentes tanto en su distribución espacial como temporal. Suponemos que se debe a la microfísica de las descargas, y por ende no podemos descartar a ninguno de ellos sin antes a ver estudiado la microfísica que caracteriza a cada uno de estos grupos. Esta investigación se llevará a cabo en el doctorado.
- Por último, encontramos que existe una relación entre la topografía y los Jumps, con una máxima frecuencia de los mismos, para dos de los tres eventos analizados, en las laderas de las montañas y sierras y en la llanura para la zona de Santa Fé. Además encontramos que este patrón concuerda con el que se observó en el estudio de la AEA en África del trabajo de Bürgesser y otros 2013[8].

Capítulo 4

Campaña RELAMPAGO

4.1. Introducción al proyecto RELAMPAGO

RELAMPAGO (Remote sensing of Electrification, Lightning, And Mesoscale/microscale Processes with Adaptive Ground Observations) es un proyecto de colaboración financiado por la Fundación Nacional de Ciencias (NSF), la Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica (NOAA), la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología de Argentina (MinECyT), la Provincia de Córdoba, Brasil (INPE, CNPq y FAPESP) e INVAP S.E., para observar las tormentas convectivas que producen eventos meteorológicos de alto impacto al pie de los Andes en Argentina. El Período de Observación Ampliado RELAMPAGO fué del 1 de junio de 2018 al 30 de abril de 2019, mientras que el Período de Observación Intensivo fué del 1 de noviembre al 18 de diciembre de 2018. CACTI (Clouds, Aerosols, and Complex Terrain Interactions) es un proyecto financiado por el Departamento de Energía de los EE. UU. para estudiar las nubes orográficas y su representación en modelos de escala múltiple del 1 de septiembre de 2018 al 30 de abril de 2019. Implicó al observatorio de radiación de aerosoles AMF-10, el Sistema Móvil de Observación de Aerosoles (MAOS), el radar de precipitación CSAPR-2 y una red meteorológica de superficie. También se llevó a cabo observaciones intensivas en el aire durante RELAMPAGO mediante el despliegue del avión G-1. El objetivo de RELAMPAGO-CACTI es el estudiar una región que tiene algunas de las tormentas eléctricas más intensas del mundo, tanto en términos de su estructura vertical, tamaño horizontal, producción de rayos y granizo, y riesgos de inundación. Estas tormentas impactan en la región de la cuenca mayor del Río de la Plata, que tiene una población de aproximadamente 160.000.000 y sin embargo son poco entendidas y pronosticadas. Comprender los procesos que conducen a estas tormentas extremas, que producen fuertes vientos, tornados, granizo dañino e inundaciones no solo beneficiará a los países de América del Sur, sino que también beneficiará nuestro conocimiento científico sobre las tormentas extremas que afectan a otras partes del mundo (incluidas las Grandes Llanuras de EE. UU.) y mejorarán los modelos meteorológicos y climáticos, que representan pobremente estos sistemas y sus efectos.

El entorno meteorológico-geográfico a sotavento de la Cordillera de los Andes, que incluye interacciones en múltiples escalas de perturbaciones sinópticas, la corriente en chorro de capas bajas de Sudamérica (SALLJ) y las complejas características del terreno producen ambientes cinemáticos, termodinámicos y de aerosoles únicos que sirven como mecanismos controladores para el inicio de la

convección, intensificación y crecimiento de escala. Estos factores contribuyen a un espectro convectivo único que gobierna los eventos meteorológicos de alto impacto en América del Sur. Las observaciones de campo intensivas y la caracterización de estos mecanismos físicos producirán una nueva comprensión de las relaciones entre los sistemas convectivos y el medio ambiente, y por lo tanto, mejorarán la predicción de la convección a nivel mundial.

RELAMPAGO tiene lugar en dos zonas en las que repetidamente se inician, crecen y producen eventos meteorológicos de alto impacto (granizo, tornados, inundaciones): cerca de las Sierras de Córdoba y cerca de Mendoza, donde el modo convectivo y los impactos meteorológicos e hidrometeorológicos son diferentes. Los resultados de RELAMPAGO tendrán un gran impacto en la comprensión de las tormentas convectivas y eventos de alto impacto, y proporcionará nuevas conexiones científicas, educativas y de divulgación entre los EE. UU. y muchos países de América Latina. Material del proyecto RELAMPAGO-CACTI <http://catalog.eol.ucar.edu/relampago>.

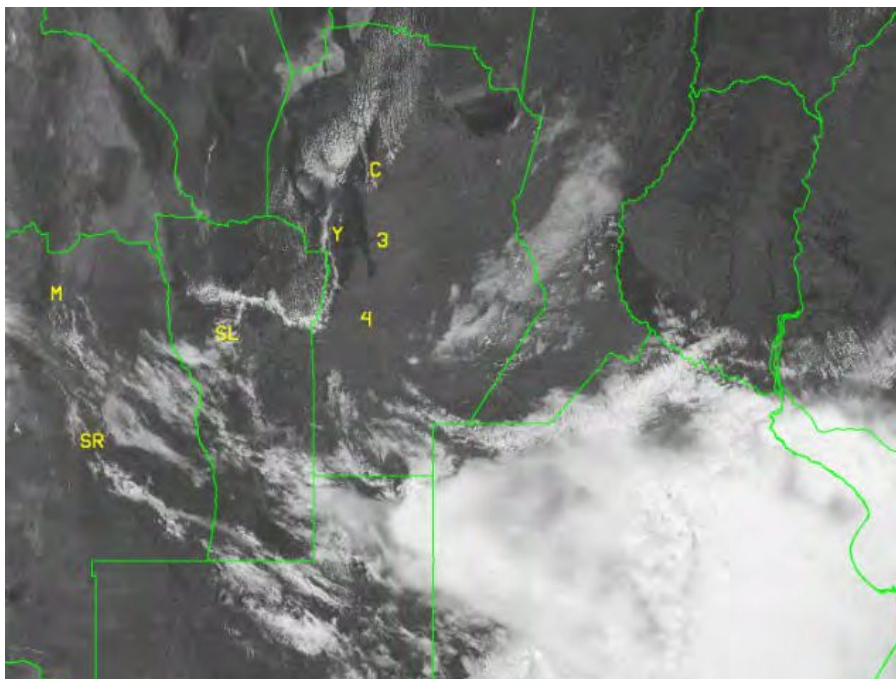


Figura 4.1: Zona de Trabajo del proyecto RELAMPAGO donde las letras representan las ciudades claves del proyecto. M: Mendoza, SR: San Rafael, SL: San Luis, Y: Yacanto, 4: Río Cuarto, 3: Río Tercero y C: Córdoba.

4.2. Misiones e Instrumentación

RELAMPAGO-CACTI se centró sobre los siguientes temas de investigación:

- **Iniciación Convectiva:** donde la hipótesis fue que los procesos de iniciación convectiva en las regiones de las Sierras de Córdoba (SDC) y Mendoza son diferentes debido a las diferencias en estabilidad, perfiles de viento, ondas de gravedad topográfica y de cizallamiento, inicio de granizo y precipitación, crecimiento de la capa límite, circulaciones orográficas y penetración del Jet de bajo nivel de Sudamérica (SALLJ).
- **Intensificación y crecimiento exclusivo de la convección:** la hipótesis fue que el crecimiento a escala, la intensificación y el backbuilding están controlados por la proximidad del SALLJ a

las características del terreno elevado e interacciones entre las cold pools, procesos microfísicos, circulaciones anabáticas, y la reconfiguración de la cizalladura vertical del viento, las tasas de lapso y la limitación causada por el terreno complejo. Se planteo además que estos procesos operán de manera diferente en las Sierras de Córdoba y Mendoza donde producen diferencias en la morfología convectiva e impactos hidrometeorológicos.

- Generación de peligroso tiempo convectivo: en este caso, la hipótesis fué que las características únicas del terreno elevado interactúan con el SALLJ y perturbaciones sinópticas para controlar fundamentalmente la inestabilidad y la cizalladura vertical del viento, influenciar la generación de climas peligrosos por sistemas convectivos, lo que explica las observadas diferencias en los impactos climáticos severos entre las regiones de Sierras de Córdoba, Mendoza y Estados Unidos.

Teniendo en cuenta estos tres temas y las hipótesis en cada uno de ellas, se desarrollarán las campañas para las cuales se realizó un estudio detallado de las condiciones climáticas y geográficas del sitio en donde se emplazarán los instrumentos de medición. Durante el periodo de observacion intensa, durante RELAMPAGO, se contó con los siguientes instrumentos de medición:

- Sistemas de Sondeos: Las observaciones de radiosondas se recopilación utilizando una combinación de sistemas de radiosondas móviles, como por ejemplo Vaisala RS 90 + IMET del Servicio Meteorológico Nacional (SMN); estas observaciones ayudarán a caracterizar la estructura vertical del viento, temperatura y la humedad en el ambiente preconvectivo, y luego ser utilizada para revelar los mecanismos de Iniciación convectiva y posterior organización convectiva y crecimiento exclusivo.
- CSWR Pods: son un conjunto de estaciones meteorológicas de superficie (Ver imagen 4.2a). Los Pods son críticos para capturar la variabilidad espacial y temporal de la superficie de variables de estado meteorológico que identifican y caracterizan características, como los límites de convergencia y la fuerza de la Cold Pool, que impactan el inicio de Convección, el crecimiento de escala , la longevidad e intensidad de la convección.
- Mesonets: Son camionetas de gran porte equipadas con instrumentos estándar, medición de viento, temperatura y humedad relativa. Figura4.2b
- Radares fijos y móviles: los radares fijos se operarán en coordinación con los Radares móviles (DOWs y Brasil XPOL). El núcleo de la estrategia de exploración del radar fué tener superposición entre los radares de longitud de onda más largos, que se encargan del escaneo microfísico que cubren el sistema para la estimación de la precipitación y el muestreo microfísico (incluidos los cuasi-perfiles verticales), mientras que los radares móviles, se centraron en la recopilación de redes de la asimilación Doppler con menos énfasis en el escaneo microfísico. Las frecuentes observaciones proporcionarán un conjunto de datos sin precedentes para probar hipótesis sobre factores que controlan el ciclo de vida de la convección y la producción acompañante de impactos (rayos, clima severo, inundaciones). En las imagenes 4.3 tenemos los radares que fueron utilizados durante las campañas.



(a) Pods. Imagen extraída de <http://www.cswr.org>



(b) Mesonets. Imagen extraída de <http://www.cswr.org>

Figura 4.2: Instrumentos de medición.



(a) DOW: Radar Doppler sobre Rueda. Imagen extraída de <http://www.cswr.org>



(b) COW: Radar de Banda C sobre rueda. Imagen extraída de la página <https://www.facebook.com/CSWRDOW/>

Figura 4.3: Radares que fueron usados en el proyecto RELAMPAGO.

4.3. Campañas

Durante RELAMPAGO, se realizaron un total de 19 misiones que se describen en las Tablas 4.a, 4.b, 4.c y 4.d en el mismo se detalla el número del periodo de observación intensa (IOP) la fecha y hora del comienzo y finalización del mismo, el tipo de misión, los instrumentos utilizados y una síntesis de cada IOP. Dentro de los instrumentos no solo se hace referencia a cada uno de ellos, si no también al organismo al que pertenecen. Es decir:

- CSU: Universidad del Estado de Colorado. (<https://www.colostate.edu>)
- UI: Universidad de Illinois. (<https://www.uillinois.edu>)
- CSWR: Centro de Investigación de tiempo severo. (<http://www.cswr.org>)

Debido al poco tiempo para realizar la evaluación de los Jumps y su relación con los eventos severos en toda las campañas, a manera explicativa analizaremos en la sección 4.4 la misión número 4 correspondiente al 10 de Noviembre del 2018 con el objeto de validar GeoRayos porque es una campaña de Severo asociado con alta actividad eléctrica.

IOP	Fecha de Comienzo	Fecha de Finalización	Tipo de Misión	Instrumentos	Síntesis de las misiones
IOP01	02-11-2018 15:00	02-11-2018 21:00	Iniciación De Convección.	Sondeos: CSU, UI, CSWR. Radar: DOW6,DOW7, DOW8.	Las tormentas débiles iniciaron aproximadamente 175 km al sur del centro de Córdoba. Las tormentas se volvieron a desarrollar lentamente hacia el norte-noreste.
IOP02	05-11-2018 06:00	05-11-2018 15:00	Crecimiento Rápido.	Sondeos: CSU, UI, CSWR. Radar: DOW7,DOW8.	Este evento contó con un MCS que se acercó desde la parte sur de la provincia de Córdoba durante la noche, y se Acercó al dominio de observación que se estableció en las llanuras principalmente al este de las Sierras Chicas. El MCS a medida que se acercaba era una sola línea de núcleos convectivos en una línea orientada NW-SE, y esta línea convectiva pasaba sobre el sitio del DOE en Villa Yacanto alrededor de las 05:00. El muestreo comenzó alrededor de las 06:00 ya que la línea fue bien muestreada por los DOW en esta época. Nuevas tormentas convectivas comenzaron a formarse al este de la línea principal alrededor de este tiempo, que también fue bien muestreada por los DOW y nuestra red de sondeos. Rápidamente, la primera línea de tormentas comenzó a decaer (en unos 30 minutos), y las tormentas que se formaron delante de la línea principal se convirtieron en un sistema convectivo organizado, mientras que la línea original mantuvo la mayor fuerza con los núcleos convectivos anclados al terreno. A las 08:00, la nueva línea se había propagado rápidamente hacia el noreste y estaba fuera del área de estudio. Las condiciones más frías y estables prevalecieron durante el resto del día en las llanuras, pero los radares CSAPR-2 y RMA1 observaron el inicio de la convección y los sistemas convectivos de larga duración en las Sierras Después de las 12:00 al norte de Villa Yacanto.
IOP03	06-11-2018 09:00	06-11-2018 18:00	Iniciación De Convección.	Sondeos: CSU, UI, CSWR. Radar: DOW7, DOW8.	
IOP04	10-11-2018 12:00	10-11-2018 19:00	Severo	Sondeos: CSU, UI2, CSWR. Radar: DOW6,DOW7, DOW8.	Finalmente llegó una baja bastante grande en altura al oeste de Chile, lo que proporcionó una elevación dinámica muy necesaria a escala sinóptica y un mejor flujo en el norte a bajo nivel en la región de Córdoba. Se ubicó una impresionante inversión de límites en la parte norte de la región de observación que ayudó a construir una energía potencial convectiva disponible (CAPE) durante el día para las fuertes tormentas durante la tarde noche. Se presentó suficiente cizalla para las tormentas de superceldas dentro del dominio de observación al sur de Córdoba; por lo tanto, los activos móviles fueron GO para una misión de clima severo.
IOP05	11-11-2018 21:00	12-11-2018 03:00	Crecimiento Rápido.	Sondeos: CSU, UI, CSWR. Radar: DOW6,DOW7, DOW8.	La vaguada de onda larga ubicada justo al lado de la costa chilena continuó moviéndose muy lentamente, pero proporcionó una elevación dinámica de nivel superior que profundizó la superficie y la desplazó lentamente Hacia el este. Esta compleja circulación en la superficie, y probablemente el extenso aire modificado por la Cold pool de la convección anterior interrumpió el flujo hacia el norte organizado en el área, especialmente al sur de Córdoba. La convección generalizada inició al NW de la SDC y atravesó la región de Córdoba durante la noche y durante todo el día, con una mezcla de celdas aisladas y agrupadas. Los equipos de hidrometeorología estaban bastante ocupados debido a las abundantes precipitaciones. El exclusivo equipo científico de crecimiento llevó a cabo una misión durante la noche durante el marco de tiempo de las 21:00 del 11 de noviembre a las 03:00 del 12 de noviembre y trató de capturar la actividad convectiva antes de que esta onda sinóptica a gran escala saliera de la región.

Tabla 4.a: Síntesis de las campañas, extraída de la página <http://catalog.eol.ucar.edu/relampago/tools/missions>.

IOP	Fecha de Comienzo	Fecha de Finalización	Tipo de Misión	Instrumentos	Síntesis de las misiones
IOP06	17-11-2018 05:00	17-11-2018 11:00	Misión Conjunta	Sondeos: CSU, UI, CSWR.	
IOP07	21-11-2018 12:00	21-11-2018 18:00	Iniciación De Convección.	Sondeos: CSU, UI, CSWR. Radar: DOW6,DOW7, DOW8.	
IOP08	22-11-2018 11:00	22-11-2018 17:00	Severo/ Crecimiento Repentino	Sondeos: CSU, UI, CSWR. Radar: DOW6,DOW7, DOW8.	
IOP09	25-11-2018 11:00	25-11-2018 17:00	Severo (San Rafael)	Sondeos: CSU, UI, CSWR. Radar: DOW6,DOW7, DOW8.	Cerca de San Rafael se observaron tormentas eléctricas y de granizo en un entorno favorable para la convección provocado por una onda corta pasajera, calentamiento sobre el terreno, humedad introducida por el Jet de baja intensidad de los Andes, alta inestabilidad y moderada cizalladura de bajo nivel. La iniciación por convección ocurrió al este de los Andes cerca de San Rafael, con celdas de rápida intensificación y verificación 2-2.5 cm del granizo en el área de enfoque de la IOP de la tarde.
IOP09B	25-11-2018 21:00	26-11-2018 15:00	Especial COW/CSU C-Band ops.	Sondeos: ARM,CSU, COW.	De la noche a la mañana, la convección en la región de San Rafael y San Luis creció de manera exclusiva, avanzando hacia las SDC y convirtiéndose en el foco de las observaciones del radar de banda C cerca de Córdoba. Mientras que la convección más profunda se limitó al terreno alto, el radar de banda C observó una iniciación por convección poco profunda a lo largo de los límites de las piletas frías y la precipitación estratiforme. Con celdas profundas incrustadas ocasionalmente.
IOP10	26-11-2018 10:00	26-11-2018 17:00	Iniciación De Convección. (San Rafael)	Sondeos: CSU, UI, CSWR. Radar: DOW7,DOW8.	Las condiciones húmedas e inestables al oeste de las Sierras promovieron el desarrollo de la convección profunda cerca de la región de San Rafael. Muchas de estas celdas se intensificaron al este de los Andes, con documentación de una celda productora de granizo por los activos móviles en la región de San Rafael. Estas intensas tormentas aumentaron de escala después de oscurecer, y continuaron avanzando hacia el oeste sobre el terreno elevado de las Sierras de Córdoba a medida que el complejo convectivo general se movía hacia el este. La convección profunda se formó repetidamente en las Sierras del sur de la noche a la mañana, llegando a ser más estratiforme por la mañana, lo que provocó importantes inundaciones y un importante evento hidrológico para RELAMPAGO.

Tabla 4.b: Síntesis de las campañas, extraída de la página

<http://catalog.eol.ucar.edu/relampago/tools/missions>.

IOP	Fecha de Comienzo	Fecha de Finalización	Tipo de Misión	Instrumentos	Síntesis de las misiones
IOP11	29-11-2018 10:00	29-11-2018 17:00	Inicio de Convección, Traspaso a Crecimiento Repentino	Sondeos: CSU, UI, CSWR. Radar: DOW7,DOW8.	El retorno de la humedad y una vaguada en el nivel superior que atraviesa el país brindaron condiciones favorables para la iniciación por convección profunda sobre el terreno elevado de las Sierras de Córdoba y el oeste cerca de los Andes. La misión se llevó a cabo para observar la iniciación sobre las SDC, pero la convección permaneció anclada sobre el terreno, ya que el flujo este seco del nivel medio cubrió el entorno al este de las montañas cercanas a Córdoba. Durante la noche, un MCS que se había formado al fusionar la convección al oeste de las Sierras se desplazó sobre la región de Córdoba como un eco estratiforme más débil y generalizado, ya que las condiciones siguieron siendo desfavorables para la convección profunda en las llanuras a lo largo de este período.
IOP12	30-11-2018 11:00	30-11-2018 19:00	Crecimiento Repentino	Sondeos: CSU, UI, CSWR. Radar: DOW6,DOW7, DOW8.	Algo de iniciación sobre las montañas en el lóbulo doble Doppler occidental. No hay mucho crecimiento exclusivo en el dominio DD.
IOP13	04-11-2018 11:00	04-11-2018 17:00	Iniciación de Convección, Traspaso a Severo	Sondeos: CSU, UI2, CSWR. Radar: DOW6,DOW7, DOW8.	
IOP14	05-12-2018 11:00	05-12-2018 19:00	Crecimiento Repentino	Sondeos: CSU, UI, CSWR. Radar: DOW7,DOW8.	
IOP15	10-12-2018 14:00	10-12-2018 18:00	Severo	Sondeos: CSU, UI, CSWR.	La misión de hoy es una misión primaria de clima severo, con exploraciones de CI antes del clima severo. Los pronósticos de modelos de alta resolución mostraron fuertes superceldas aisladas al sur de Río Cuarto, por lo que el equipo de Severe se enfocó en esas tormentas potenciales. Los equipos salieron de Villa Carlos Paz a las 12:00 para conducir a Río Cuarto. Las tripulaciones móviles estaban en su lugar en aproximadamente 15:30. Se observó un capping de inversión muy fuerte durante la duración del evento como se ve en los sondeos operacionales y móviles, y las imágenes de vapor de agua de nivel inferior del GOES-16 (Banda 10). Se inició una gran supercelda, pero estaba ubicada mucho más al sur de Río Cuarto de lo que los equipos estaban preparados para viajar. Por lo tanto, la misión finalizó a las 17:25 porque la convección severa no se inició en ningún lugar cerca de los Activos móviles y las tripulaciones durante la noche en Río Cuarto.

Tabla 4.c: Síntesis de las campañas, extraída de la página
<http://catalog.eol.ucar.edu/relampago/tools/missions>.

IOP	Fecha de Comienzo	Fecha de Finalización	Tipo de Misión	Instrumentos	Síntesis de las misiones
IOP16	11-12-2018 14:00	11-12-2018 19:00	Severo	Sondeos: CSU, UI, CSWR. Radar: DOW6,DOW7, DOW8.	Este día se llevó a cabo una misión principal de Severe, en cooperación con el grupo de CI para la convección cerca de Río Tercero. Las cuadrillas móviles comenzaron sus operaciones a las 14:00, mientras que las operaciones de COW comenzaron a las 13:00. Algunas de las simulaciones de modelos de mesoescala de alta resolución mostraron la posibilidad de pequeñas tormentas discretas entre Río Tercero y Córdoba. Los activos móviles se organizaron en tres líneas verticales a lo largo de caminos pavimentados que abarcan desde cerca del terreno hasta sobre las llanuras.
IOP17	13-12-2018 19:00	14-12-2018 00:00	Crecimiento Repentino (Severo Secundario)	Sondeos: CSU, UI, CSWR. Radar: DOW7,DOW8.	La misión para el 13 de diciembre fue una misión principal de crecimiento de escala dirigida a un MCS centrado en el terreno en un frente frío después de que oscureciera (aproximadamente de 18:00 a 01:00). Una misión secundaria dirigida a objetivos de clima severo ocurrió a última hora de la tarde antes de la misión principal con algunos equipos que transportan a Villa María (SE de Córdoba) con el potencial de muestrear superceldas severas al este de Río Cuarto. La misión severa secundaria que intentó muestrear las superceldas severas no tuvo éxito ya que la convección que se inició fue más al sur de lo previsto y estaba fuera del alcance de las tripulaciones móviles y la mayoría de los radares. Los equipos móviles fueron a la región de Córdoba para prepararse para la misión principal en las primeras horas de la tarde. Las celdas convectivas que se inician en el terreno al sur de Río Cuarto (14:00-15:00) y al norte de San Luis (18:00-22:00) mostraron indicios de rápido crecimiento de escala. Frente moviéndose por la zona. Se observó un crecimiento a gran escala muy rápido (<15 minutos) asociado con una propagación directa discreta a medida que la línea de celdas convectivas continuaba creciendo y moviéndose sobre la región de Córdoba donde se encontraban los activos móviles y fijos. A las 01:00, todas las líneas individuales de convección se fusionaron para formar un MCS lineal muy grande con su borde occidental anclado a las Sierras de Córdoba con un backbuilding continuo. Inundaciones, vientos fuertes, granizo grande y un tornado (cerca de San Francisco al este de Córdoba) se informaron durante este evento. Este caso fue un excelente ejemplo de la convección única que ocurre en Sudamérica y fue un caso excelente para el proyecto RELAMPAGO en su Conjunto.
IOP18	15-12-2018 16:00	15-12-2018 20:00	Iniciación de Convección	Sondeos: UI, CSWR. Radar: DOW7,DOW8.	Se realizó una misión especial para observar el transporte de vapor de agua dentro de la PBL, utilizando una densa red de sondeos, pods y cobertura Doppler dual que rodea el dial de vapor de agua. Se recogieron amplias observaciones in situ en un PBL mixto y relativamente seco. DOW7 realizó la estrategia de exploración lenta de CI y observó la estructura de la capa límite convectiva durante varias horas. DOW8 estaba teniendo problemas de control de la antena. No está claro si se logró realmente un doble Doppler. Debido a estas dificultades de control de la antena, DOW7 realizó RHI durante aproximadamente una hora, apuntando directamente sobre el DIAL de vapor De agua en Pilar.
IOP19	16-12-2018 13:00	16-12-2018 18:00	Iniciación de Convección	Sondeos: UI, CSWR.	Se desplegó un número limitado de activos (1 DOW, 3 mesonets móviles, una sonda UI) para estudiar el posible CI a lo largo de la SDC cerca de Villa Yacanto. DOW7 se implementó aproximadamente 17 km al norte de CSAPR para recopilar datos de Doppler dual de resolución de 15 minutos en la pendiente este de la SDC. Los sondeos se recolectaron en Villa Carlos Paz, La Cumbrecita, Villa Yacanto y Nono (al oeste de las SDC). Se establecieron pods para muestrear el flujo hacia el norte aguas arriba de la zona objetivo.

Tabla 4.d: Síntesis de las campañas, extraída de la página <http://catalog.eol.ucar.edu/relampago/tools/missions>.

4.4. Descripción del Evento de del 10 de noviembre de 2018

4.4.1. Situación Meteorológica

4.4.1.1. Caracterización extraída del trabajo del Sumario de RELAMPAGO del 10 de Noviembre del 2018(<http://catalog.eol.ucar.edu/relampago>).

El eje de vaguada en altura en el Pacífico en capas altas se posicionó justo por encima del flujo ascendente de los Andes durante todo el día, afectando a la región de Córdoba. La posición de esta vaguada produjo un fuerte jet noroeste por encima de dicha región, induciendo además una ciclogénesis orográfica en superficie. La circulación alrededor del mismo y el alto superficial subtropical sobre el Atlántico incrementó el flujo norte a bajo nivel sobre la provincia de Córdoba durante el día. A un nivel de 850hPa, este flujo fue particularmente fuerte, especialmente entre las 09:00 y las 15:00 horas locales en el norte de la provincia de Córdoba. En este nivel se tuvo una fuerte convergencia de humedad en un área amplia, inicialmente al sur de Río Cuarto a las 03:00. Entre las 03:00 y las 15:00 esta línea de convergencia avanzó lentamente hacia el norte, y hacia las 12:00 se evidenció una nueva región de humedad en la parte oriental de las Sierras de Córdoba, donde el viento viró ligeramente al Noreste y se dirigió hacia terrenos más altos. Estas regiones de convergencia se volvieron ubicaciones de iniciación convectiva. Durante la mañana, hubo una capa significativa de inhibición convectiva (CIN) en las mediciones de radar en Villa María del Río Seco y Córdoba a las 09:00 del 10 de noviembre. Esta capa era un tanto más débil más al sur, sobre Yacanto. Todos estos sensados mostraron una elevada inestabilidad y tasas muy abruptas, resultando en valores de energía potencial convectiva disponible (CAPE) en la superficie cercanos a $1500 Jkg^{-1}$, indicando que la atmósfera estaba lista para la convección. Los flujos superficiales del norte y noreste siguieron trayendo humedad en el área con temperaturas de punto de rocío alcanzando los $20^{\circ} - 24^{\circ}$ en Córdoba y en el noreste, al menos hasta que la actividad de la Cold Pool interrumpió el proceso. Entre las 21:00 del 9 de Noviembre – 05:00 del 10 de Noviembre los valores más altos de humedad estaban acotadas en la capa menor a 1km. A las 05:00 se evidenció una humectación de la capa entre 1 y 2 km, y en el transcurso del día el vapor de agua siguió creciendo entre los 0 y 2 Km, en profundidad hasta los 2.5 Km para las 15:00-17:00. La vaguada de onda larga ofreció empuje en las capas medias y altas e incrementó el flujo norte en capas bajas, calentándolas y humectándolas. Esto produjo una fuerte erosión de la capa hacia la tarde, tal como se puede ver en los sensados tomados en Córdoba y Yacanto. Las tormentas que se iniciaron sobre la noche y la mañana al sur de Río Cuarto se mantuvieron bastante más al sur de la zona de observación, y una intensa MCS ocurrió en las cercanías de Buenos Aires (Figura 4.4). A pesar de que las tormentas sureñas se mantuvieron lejos del área de observación, generaron una Cold Pool que viajó al norte en dirección a Río Cuarto. El primer comienzo de tormenta en la región de Córdoba parece haber ocurrido en la intersección con la frontera de este Cold Pool entre Río Cuarto y San Luis, en el borde sur de las SDC a las 11:40 aproximadamente. Esta tormenta desarrolló intensos valores de reflectividad según CSAPR (más de 55 dbz a una altura de 1km), y las características de la polarización dual sugieren contenido de granizo.

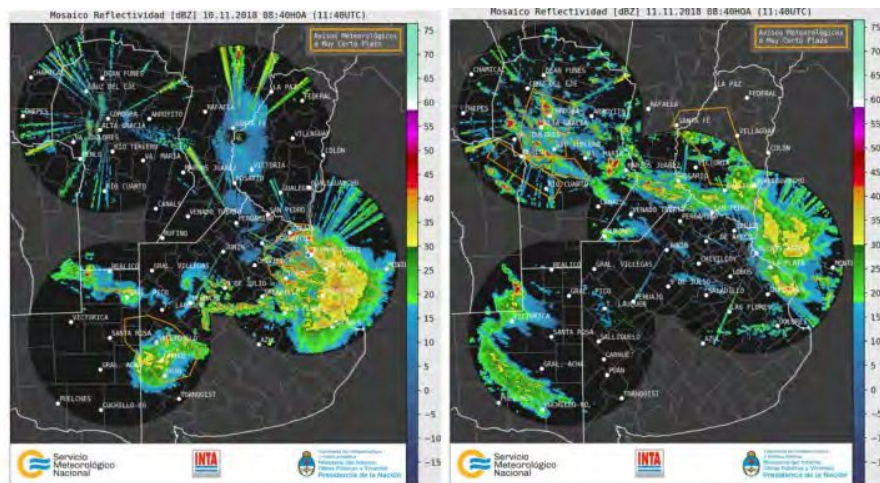


Figura 4.4: Mosaicos de reflectividad del radar de las 09 de los días 10 y 11 de noviembre. Extraída del trabajo del Sumario de RELAMPAGO del 10 de Noviembre del 2018.

Para las 14:00, esta tormenta generó un nueva Cold Pool que se propagó hacia el norte por sobre las Sierras de Córdoba (SDC) y entró el área de cubrimiento del DOW. A medida que esta Cold Pool alcanzó y pasó las porciones meridionales de las Sierras Chicas, una nueva celda se inició cerca de Santa Rosa de Calamuchita a eso de las 16:00, y se desarrolló aún más a medida que se corrió hacia el este sobre las Sierras Chicas por la ruta 36. Esta celda creció rápidamente en altitud, y la tormenta se intensificó rápidamente alcanzando la madurez entre 1 y 1.5 horas, según registro fotográfico desde el Hotel Americano (Fig.4.5) y por la tripulación de sondeo ubicada justo al norte de Río Tercero (Fig.4.6). El grupo de electrificación notó un incremento importante en la tasa de descarga de rayos, probablemente asociado con la intensificación veloz de la corriente ascendente (fig 4.7). Después de este desarrollo veloz, la tormenta adquirió una rotación de baja altura, cerca del Camino Despeñaderos-Río Tercero, a eso de las 17:00, asemejándose a una clásica supercelda para eso de las 17:20-17:40. Esta supercelda produjo granizo intenso en el sitio COW ($31,9793759^{\circ}S, 64.2177780^{\circ}O$), dañando instrumental. Comparando los sensados de radar con las imágenes infrarrojas se ha podido determinar topes nubosos por encima de la tropopausa. A medida que esta tormenta pasó por el este de la ruta 9, una nueva celda se inició después de las 17:45 cerca de las Sierras Chicas.

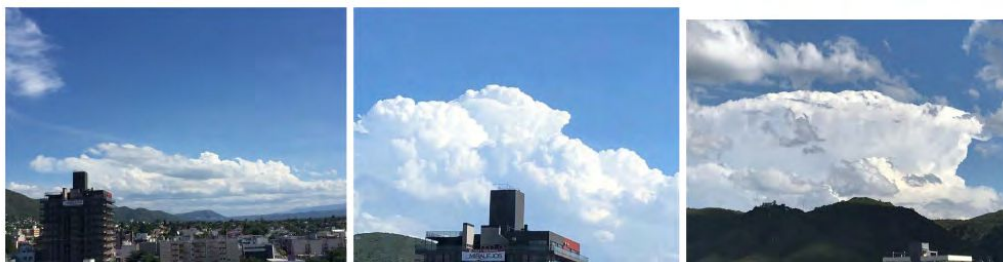


Figura 4.5: Secuencia fotográfica de la tormenta que se inició cerca de Santa Rosa de Calamuchita desde el punto de vista del Hotel Americano mirando hacia el sur. La primera fotografía se tomó aproximadamente a las 16:00 (izquierda, foto de Angela Rowe), la segunda se tomó a las 16:37 (centro, foto de Lynn McMurdie) y la tercera se tomó a la 17:03 (derecha, foto de Jake Mulholland). Extraída del trabajo del Sumario de RELAMPAGO del 10 de Noviembre del 2018.



Figura 4.6: Secuencia fotográfica de la misma tormenta tomada en Río Tercero, tomada a las 16:38 (izquierda) y 1713 (derecha). Fotos de Stephen Nesbitt. Extraída del trabajo del Sumario de RELAMPAGO del 10 de Noviembre del 2018

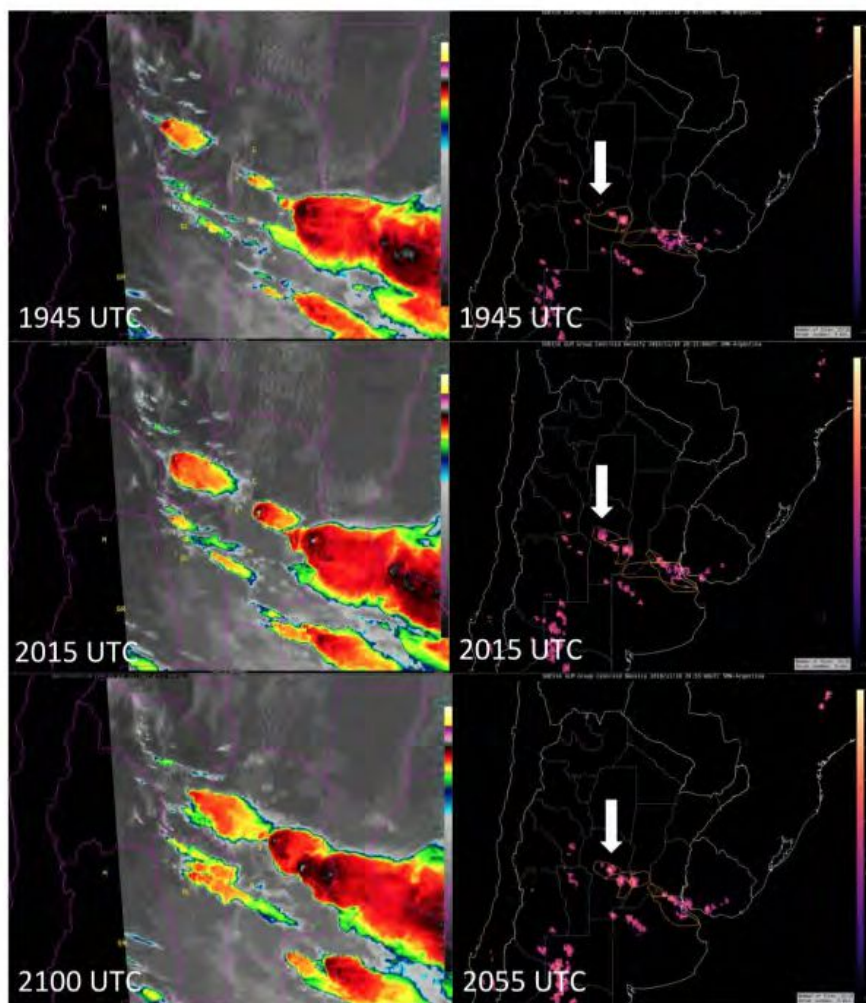


Figura 4.7: Los relámpagos se superponen con los datos del satélite GOES durante la intercepción de la supercelda. Extraída del trabajo del Sumario de RELAMPAGO del 10 de Noviembre del 2018

Después y durante el anochecer, la actividad convectiva continuó en el terreno, con nuevas tormentas continuamente iniciándose y moviéndose hacia el este. Estas tormentas tuvieron un impacto significativo en la provincia de Córdoba, con numerosos reportes de granizo, actividad eléctrica e inundaciones (fig 4.8y 4.9). El total de precipitación alcanzada por el período de 24 horas comprendido entre las 00:00 10 de Noviembre hasta las 00:00 11 de Noviembre fue de 75 mm en algunos sitios.

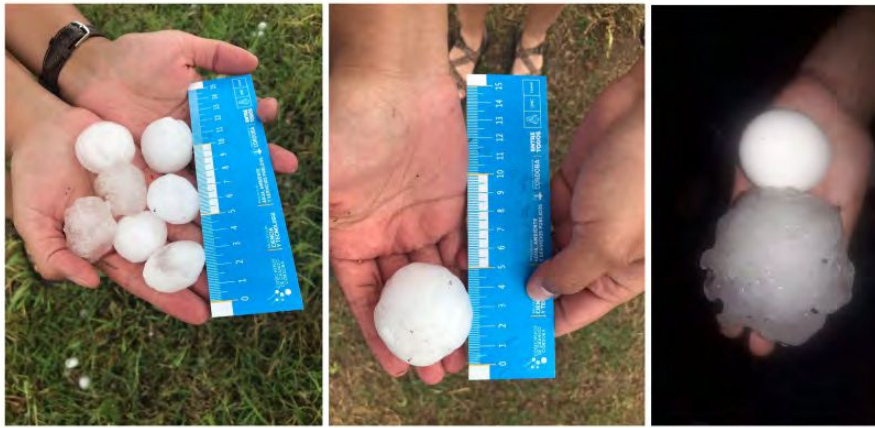


Figura 4.8: Fotos de granizo recogidas de algunas de las super celdas de la región. Los dos a la izquierda procedían del sitio de COW recogido a las 17:43 del 10 de noviembre. Extraída del trabajo del Sumario de RELAMPAGO del 10 de Noviembre del 2018

En cuanto a la caracterización de granizo, a modo de resumen se puede indicar el granizo detectado un poco después de las 16:00 en el sitio COW ($31,9793759^{\circ}S, 64.2177780^{\circ}O$). También, se detectó granizo entre Oncativo y Oliva (entre $22.3198311915^{\circ}S, 63.6221034^{\circ}O$ a las 18:06 y $32.0199512^{\circ}S, 63.5901151^{\circ}O$ a las 18:10). Fue un granizo que empezó con el tamaño de un guisante y evolucionó hasta tener impactos máximos entre los 2 y 3 cm. El equipo de trabajo se refugió en Oliva debajo de una estación de servicio ($32.032365^{\circ}S, 63.578832^{\circ}O$) donde se evidenció precipitación intensa y ocasionalmente algo de granizo.

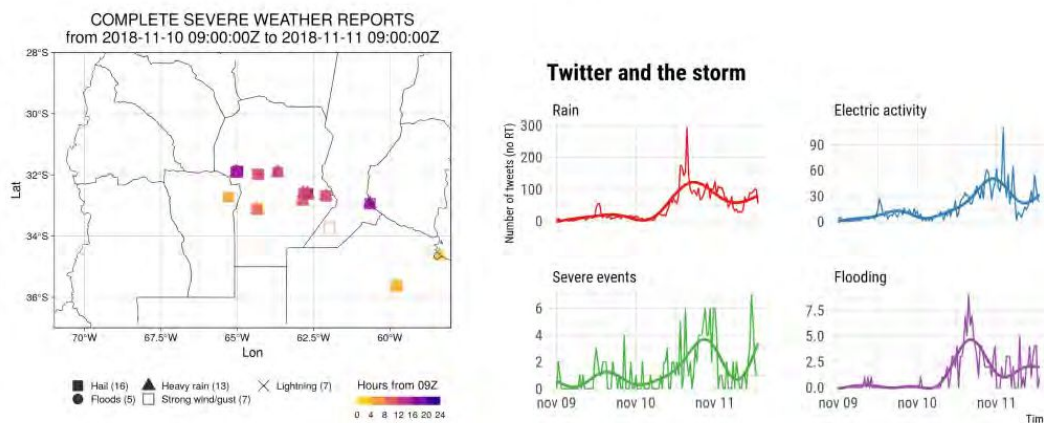


Figura 4.9: Resumen de los informes de twitter sobre la actividad de clima severo que abarca la actividad de tormenta severa del 10 de noviembre. Extraída del trabajo del Sumario de RELAMPAGO del 10 de Noviembre del 2018

4.4.2. Evaluación de la Actividad Eléctrica Atmosférica y Jumps durante la misión.

En las Tablas 4.e y 4.f se muestran los eventos de granizo y precipitaciones intensas reportados durante la campaña, que ocurrieron el 10 de Noviembre del 2018 y el análisis de los mismos con respecto al Jump detectado o no para dicho evento. Para la evaluación se tomaron los datos del Reporte de eventos reemitidos por el grupo RELAMPAGO EDU, el cual esta formado por estudiantes de la Universidad de Buenos Aires y La Plata, dichos estudiantes recopilaron la información a través

de las redes sociales; y los datos de JUMP que fueron emitidos por el algoritmo GeoRayos. Se trabajo con una ventana temporal de ± 60 minutos donde se considero como positivo el aviso de GeoRayos, si existio dentro de dicha ventana temporal un Jump para el evento reportado. También se considera como positivo si la distancia entre el Jump y la zona del reporte se encuentran a una distancia igual a dos radios de la circunsferencia del Jump reportado. Esta umbral en la distancia se considera de dos radios debido a que al tomar una ventana temporal de 60 minutos tenemos que tener en cuenta que durante dicho tiempo la celda está en movimiento. Los eventos reportados fueron, granizo, lluvia intensa, ráfagas, rayos y truenos y Tornados (trombas, remolino de polvo y nube embudo). De los cuales solo se tomaron para la evaluación granizos y lluvias intensas.

Analizando las tablas 4.e y 4.f, encontramos un total de 40 eventos reportados, de los cuales 16 corresponden a Lluvia intensas y 24 a Granizos, con estos eventos se llevo a cabo la tabla 4.1 Observando dicha tabla puedes concluir que obtuvimos un total de 17 casos positivos para granizos con un tiempo promedio de -33 minutos y una distancia promedio de 20.7 kilómetros para los granizos que ocurrieron antes del Jump y un tiempo y distancia promedio de 7 minutos y 21 kilometros para los granizos que sucedieron luego del Jump. En el caso de lluvias intensas obtuvimos un total de 11 casos positivos con 33.5 minutos y 21 kilometros promedios para las lluvias intensas que anteceden a un Jump, y 32 minutos y 14 kilómetros para las lluvias intensas que preceden un Jump. Dentro del análisis de los mismos, encontramos problemas principalmente con las lluvias intensas, debido a que a veces los tiempos son muy largos y es difícil de cuantificar la severidad. Es muy importante señalar que en los dos casos reportados por el grupo de granizo, los tiempos de emisión del Jump fueron en un caso 17 minutos antes del evento y en el otro de 0 minutos, y a su vez las distancias entre los Jumps y los eventos fueron muy próximas.

Evento	Fecha Y Ocurrencia Del Evento	Duración Del Evento	Localización en Donde Ocurre el evento	Evento Reportado	Jumps	Distancia	Tiempo Con respecto Al Jump	Aviso Positivo
1	10-11-2018 09:00		Tilisarao.	Granizo.	No se observa Jump.			No.
2	10-11-2018 14:15	14:15 – 14:18	Rio Cuarto, Macrocentro.	Lluvia Intensa.	13:23 Radio del cluster=58km	58 km.	-52 minutos.	Si.
3	10-11-2018 16:00	16:00 – 18:00	Ordoñez, Córdoba.	Lluvia Intensa.	16:30 Radio del cluster=14km	14 km.	14 minutos.	Si.
4	10-11-2018 16:58		Ruta 36, Kilómetro 738.	Granizo.	17:06 Radio del cluster=20km	20 lm.	4 minutos.	Si.
5	10-11-2018 17:15	17:15 – 17:50	Marcos Juárez, Córdoba.	Granizo.	17:30 Radio del cluster=33km	33 km.	14 minutos.	Si.
6	10-11-2018 17:20		Corralito, cerca Del COW. Latitud: -31,99 Longitud: -64,30	Granizo.	17:06 Radio del cluster=20km	20 km.	14 minutos.	Si.
7	10-11-2018 18:00	5 a 10 minutos.	Bell Ville	Granizo.	18:10 Radio del cluster=15km	15 km.	10 minutos.	Si.
8	10-11-2018 18:00	18:00 – 18:06	Morrison, Córdoba.	Granizo.	18:10 Radio del cluster=18km	18 km.	4 minutos.	Si.
9	10-11-2018 18:06		Latitud: -31,98 Longitud: -63,62 Datos del Grupo De Granizo.	Granizo.	17:49 Radio del cluster=18km	1 km.	-17 minutos.	Si.
10	10-11-2018 18:10		Latitud: -32,01 Longitud: -63,59 Datos del Grupo De Granizo.	Granizo.	18:10 Radio del cluster=15km	1 km.	0 minutos.	Si.
11	10-11-2018 19:00		Oncativo.	Lluvia Intensa.	18:37 Radio del cluster=18km	18 km.	37 minutos.	Si.
12	10-11-2018 19:00	Lluvias continuas pero leves, Hay Acumulación De agua.	Villa María.	Lluvia Intensa.	18:10 Radio del cluster=46km	46 km.	-50 minutos.	Si.
13	10-11-2018 20:00		Tilisarao.	Granizo.	19:07 Radio del cluster=26km	26 km.	-53 minutos.	Si.
14	10-11-2018 21:30	21:30 – 24:00	Los Pozos. Latitud: -31.91 Longitud: -65.03	Granizo.	19:07 Radio del cluster=17km	22 km.	46 minutos.	No.
15	10-11-2018 22:00		Calamuchita	Lluvia Intensa.	No se observa Jump.			No.
16	10-11-2018 23:20	25 minutos.	San Huberto a 5km Al sur de Nono.	Granizo.	No se observa Jump.			No.
17	10-11-2018 23:30	Pocos Minutos.	Los Homillos, Córdoba.	Granizo.	23:14 Radio del cluster=17km	17 km.	-16 minutos.	Si.
18	10-11-2018 23:30		Las Rabonas.	Granizo.	23:14 Radio del cluster=16km	1 km.	-14 minutos.	Si.
19	10-11-2018 23:44		Rio Cuarto, Córdoba. Latitud: -33.11 Longitud: -64.35	Granizo.				Dudoso.
20	10-11-2018 23:50		Las Rabonas.	Granizo.	23:14 Radio del cluster=21km.	21 km.	-36 minutos.	Si.

Tabla 4.e: Eventos del 10 y 11 de Noviembre del 2018 con datos de Jumps.

Evento	Fecha Y Ocurrencia Del Evento	Duración Del Evento	Localización en Donde Ocurre el evento	Evento Reportado	Jumps	Distancia	Tiempo Con respecto Al Jump	Aviso Positivo
21	11-11-2018 00:00	40 minutos.	Bell Ville.	Lluvia Intensa.	23:34 del 10-11-2018 Radio del cluster=34km.	34 km.	-26 minutos.	Si.
22	11-11-2018 07:00	07:00-09:30	Camino San Carlos Km 8.	Lluvia Intensa.	09:00 Radio del cluster= 13km.	13 km.	-30 minutos.	Si.
23	11-11-2018 08:00		Santa Rosa de Calamuchita.	Lluvia Intensa.	No se observa Jump.			No.
24	11-11-2018 10:00		Marcos Juárez, Córdoba.	Lluvia Intensa.	No se observa Jump.			No.
25	11-11-2018 10:00	22:00-10:00	Villa Nueva.	Lluvia Intensa.	Periodo muy largo.			No.
26	11-11-2018 10:00	22:00-10:00	Villa María.	Lluvia Intensa.	23:34 del 10-11-2018 Radio del cluster=34km.	1 km.	0 minutos.	Si.
27	11-11-2018 12:00		Mina Clavero.	Lluvia Intensa.	No se observa Jump.			No.
28	11-11-2018 12:05	00:00-06:50	Villa Nueva.	Lluvia Intensa.	23:34 del 10-11-2018 Radio del cluster=34km.	1 km.	0 minutos.	Si.
29	11-11-2018 13:00		María Juana, Santa Fé.	Granizo.	12:10 Radio del cluster=45km.	45 km.	-50 minutos	Si.
30	11-11-2018 16:00		Las Rabonas.	Granizo.	No se observa Jump.			No.
31	11-11-2018 18:00		Cruz del Eje.	Granizo.	No se observa Jump.			No.
32	11-11-2018 20:40		Rafael Garcia, Cba. Latitud: -31.65 Longitud: -64,22	Granizo.	No se observa Jump.			No.
33	11-11-2018 21:15	21:15-21:30	Merlo, San Luis.	Granizo.	21:00 del 10-11-2018 Radio del cluster=14km.	14 km.	0 minutos.	Si.
34	11-11-2018 21:35		Villa del Totoral.	Granizo.	21:06 del 10-11-2018 Radio del cluster=23km.	23 km.	-24 minutos.	Si.
35	11-11-2018 22:00	22:00-02:00	Merlo, San Luis.	Granizo.	22:36 del 10-11-2018 Radio del cluster=30km.	30 km.	-25 minutos.	Si.
36	11-11-2018 23:00		Sacanta.	Lluvia Intensa.	22:05 Radio del cluster=13km.	2 km.	-55 minutos.	Si.
37	11-11-2018 23:15	23:15-23:25	Latitud: -30.70 Longitud: -64.83	Granizo.	21:06 Radio del cluster=11.6km.			Dudoso.
38	11-11-2018 23:20	23:20-23:25	Latitud: -31.53 Longitud: -64.39	Granizo.	No se observa Jump.			No.
39	12-11-2018 06:30		Rio Cuarto.	Lluvia Intensa.	07:36 Radio del cluster=20km.	10 km.	30 minutos.	Si.
40	12-11-2018 08:00	02:00-05:00	Carlos Paz.	Lluvia Intensa.	01:04 Radio del cluster=13km.	13 km.		Dudoso.

Tabla 4.f:Eventos del 10 y 11 de Noviembre del 2018 con datos de Jumps.

Eventos	Negativo	Positivos		Dudosos
		Antes	Después	
Granizo	5	12	5	2
Lluvias Intensas	4	8	3	1

Tabla 4.1: Cantidad de eventos reportados con la cantidad de avisos negativos y positivos de Jumps para cada evento.

Para terminar con esta evaluación se realizó el gráfico 4.10, donde observamos el Ciclo Diario del Jump para ese día. Si lo comparamos con los gráficos 3.4 y 3.31 del Ciclo Diario para todos los datos y aquellos Jumps donde tenemos AEA en todas sus etapas de Schultz, observamos que este día presenta un comportamiento similar, con un máximo a las 19:00 horas y mínimo para las 14:00 horas.

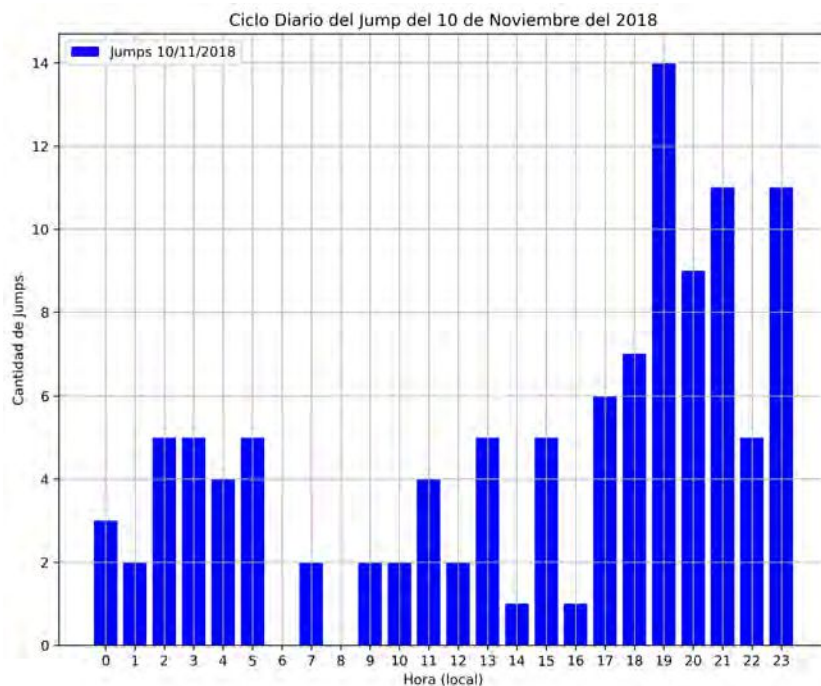


Figura 4.10: Ciclo diario del Jump del 10 de Noviembre del 2018

4.5. Conclusión de la campaña dentro del marco de este trabajo

Como conclusión podemos decir, que el día 10 de noviembre del 2018, fue un día positivo para RELAMPAGO ya que se obtuvo mucho datos y en nuestro caso, obtuvimos una buena validación de GeoRayos, con 28 avisos positivos de 40 eventos reportados entre los días 10 y 11 de noviembre. De estos 28 positivos, 17 correspondientes a Granizos y 11 a lluvias intensas. En un principio podemos concluir con este estudio que en general los Jumps serían precesores de eventos severos, con un anterioridad promedio de 33 minutos y una distancia aproximada de 19 kilómetros entre el evento reportado y el Jump observado. Con respecto a la validación, como se dijo anteriormente, se presentaron ciertos inconvenientes debido a que la información aportada por la gente del suceso no es del todo precisa, lo que se debe tener en cuenta a la hora de realizarla. Este problema no se presentó con los eventos reportados por el grupo de granizo porque estos fueron bastante exactos.

Analizando el ciclo Diario de esta tormenta con las tormentas del periodo de estudio esta tesis(2015-

2017) observamos que el comportamiento es bastante similar, con un incremento a la noche de la AEA, obteniendo un máximo a las primeras horas, es decir a las 19 en este caso, y un mínimo para las horas de la tarde, para las 14 horas.

Para finalizar adjuntaremos la carta de invitación al proyecto RELAMPAGO, seguido de una imagen correspondiente al grupo CSWR, al cual formabamos parte con la Dra. Nicora (Imagen4.11) y realizaré una breve conclusión de mi paso por RELAMPAGO.

RELAMPAGO fue un proyecto que no solo aportó dato en la zona de Córdoba y Mendoza, si no que también aportó una gran cantidad de experiencia en el área de trabajo y personal. Tuve la suerte de poder estar trabajando en el centro de operaciones donde mi tarea se basó en asistir al coordinador del CSWR, en las escuelas dando charlas sobre RELAMPAGO y el proyecto Protección y Prevención contra Rayos, y en menor medida puede estar en el campo junto al equipo de toma de datos del CSWR. Al poder participar en todas estas áreas, pude observar como cada una de ellas se nutre una de la otra. En síntesis un día en la campaña comienza con la toma de decisiones en el centro operaciones donde se define entre los investigadores principales del proyecto, después de haber escuchado y analizado el Pronóstico realizado por la gente del Servicio Meteorológico Nacional y alumnos del Doctorado en Meteorología de la Universidad de Buenos Aires, y de Estados Unidos, que misión se realizará. Una vez que se decide y se planifica la misión, prosigue la toma de datos, donde el equipo de CSWR sale al campo a tomar dichas medidas, mientras que en el centro de operaciones evalúan al mismo tiempo la situación atmosférica y, se va informando de la misma al equipo de Campo. Una vez finalizada la misión el equipo de campo regresa y descarga los datos, los cuales son analizados al finalizar la campaña. Si durante la misión o no hubo lluvia intensa, un equipo del proyecto sale a tomar datos sobre la crecida de los ríos, esto lo realiza el grupo del Hidrometeorología, con lo que el proyecto es bastante completo. Los días en los que no había misión se realizaban actividades en las escuelas, con el objetivo de que la gente conozca el proyecto y participe en él por medio de los proyectos de Ciencia Ciudadana de Córdoba.

Con esta campaña pude aprender como la unión de varios países pueden lograr cosas increíbles, como el trabajo en grupo es muy importante y cada parte del mismo no es más ni menos importante que el resto. Como así también, lo importante que es para el desarrollo profesional y personal el poder trabajar en este tipo de campañas.



Department of Atmospheric Sciences

School of Earth, Society, and Environment
1301 W Green Street, Rm 3081
Natural History Building MC-104
Urbana, IL 61801 USA

Estimada Constanza Villagrán Asiares,

El equipo científico del experimento RELAMPAGO (Remote sensing of Electrification, Lightning, And Mesoscale/microscale Processes with Adaptive Ground Observations) y CACTI (Clouds, Aerosols, and Complex Terrain Interactions) se complace en invitarle a participar en la actividades de campo que se desarrollarán entre el 26 de Octubre hasta el 20 de Diciembre de 2018 en el Hotel Amerian en Villa Carlos Paz - Córdoba - Argentina.

Durante la campaña de observación se la invita a participar activamente de las tareas diarias de pronóstico y toma de decisión de los esquemas de observación; participar activamente de los equipos de tomas de observaciones portables; presentación de nuevas herramientas de detección de fenómenos severos; confección de mapas con áreas afectadas por fenómenos severos; así como actividades educativas de transferencia de conocimiento en colegios secundarios y primarios de la zona.

Desde ya esperamos su imprescindible colaboración.

Sinceramente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Stephen W. Nesbitt'.

Prof. Stephen W. Nesbitt
Investigador Principal proyecto RELAMPAGO
Universidad de Illinois en Urbana-Champaign
snesbitt@illinois.edu



Figura 4.11: Foto del equipo CSWR durante RELAMPAGO. Foto tomada por Miguel Otaviano.

Capítulo 5

Conclusiones

En esta tesis expusimos un trabajo novedoso al usar un parámetro como los “jumps”, como marcadores de procesos microfísicos en las nubes al cual asociamos a eventos severos. Creemos que el mismo representa el inicio de un nuevo camino en el uso de las descargas como proxies de severidad meteorológica. Recordemos los interrogante que quisimos responder en este trabajo de tesis. EL objetivo general fué realizar la Caracterización de la Actividad Eléctrica Atmosférica en la zona central de Argentina, definida entre las latitudes $[-28^\circ, -36^\circ]$ y las longitudes $[-70^\circ, -60^\circ]$, por medio de las variaciones en la tasa de descargas eléctricas para el período comprendido entre los años 2015 a 2017. En la caracterización se tuvo presente los siguientes interrogantes:

- 1 ¿Cuáles fueron las zonas más frecuente de descargas eléctricas que producen Jumps?
- 2 ¿Que área promedio poseían estos Jumps?
- 3 ¿En que momento del año tenemos más Jumps?
- 4 ¿Existio alguna relación entre las tormentas con más Jumps registradas en el 2015 a 2017 y la distribución espacial de Jumps?
- 5 ¿A que hora se produjeron más?
- 6 ¿Existe alguna relación con el inicio de Convección?
- 7 ¿La topografía ifluye?

Luego de realizado todo el trabajo de estudio se pudo responder muchos de esos interrogantes y se generaron muchos otros, con nuevas lineas de investigación a futuro.

Para empezar a responder, nos ubicaremos de acuerdo a como se fueron resolviendo los mismos en las diferentes secciones. Empecemos con el ciclo diario del Jump; analizando este obtuvimos la mayor frecuencia de Jumps en las primeras horas de la noche, 20 horas locales, y la mínima frecuencia en las horas de la tarde, más precisamente a las 15 horas. Proseguimos con un análisis exploratorio a las variables cantidad de rayos, área y umbral del cluster severo, para las tres variables encontramos que el tipo comportamiento que siguen es logarítmico con lo que se le realizó una transformación logarítmica obteniendo para cantidad de rayos y el umbral el mismo comportamiento y para el área un comportamiento prácticamente gaussiano, con lo que obtuvimos que la mayor cantidad de Jumps

tienen cluster con áreas entre $[9.55km^2, 6025.6km^2]$, pero luego de hacer el estudio bivariado llegamos a la conclusión que existe una tendencia a que las áreas asociadas a los jumps sean menores a $1000 km^2$.

Con respecto al Umbral, se encontró una presencia importante de datos entre los valores 7 y 10, lo cual marca una posible diferencia con el umbral empíricamente establecido por Nicora y otros 2015[23], lo cual va a ser uno de los temas para trabajos futuros.

En relación a la cantidad de rayos se obtuvo para estos años un promedio general de 52.51 descargas atmosféricas por cluster (es importante recordar que estos valores son en función de la base de datos con que trabajamos WWLLN la cual posee una eficiencia alrededor del 10). También se analizó su comportamiento anual y mensual, donde encontramos que la mayor AEA ocurre durante los meses del Verano, mostrando el mínimo en los meses de invierno. Durante esos meses de invierno se ve una disminución en la tasa de descargas involucradas en cada cluster, y también se observa que los mismos se dan en la porción este de la zona de estudio (Provincia de Santa Fe, este de Córdoba). Se encontró que todas estas ciudades con más DEA por mes durante el 2015, 2016 y 2017 comparten ciertas características en común como por ejemplo la altitud con un promedio general de 139 metros. En general, son eventos que suceden más frecuentemente en la madrugada y en especial tienden a darse más en la zona noreste de la región de estudio. Uno de los resultados que a nuestro parecer es de importancia especialmente a nivel de riesgo en las ciudades, fue la clasificación de los días con mayor AEA por cada mes para cada año estudiado, y se encontraron cinco ciudades que se repiten en estos años. Estas son General López, 9 de Julio, Vera y San Cristóbal, todas estas ciudades de Santa Fé y San Justo de la provincia de Córdoba. Esto es interesante recalcar, porque serían ciudades con un alto índice de Jump, por lo que se podría inferir de manera exploratoria, que serían ciudades más propensas a Eventos Severos. Además de estas ciudades con alto índice de Jump, se decidió separar a los datos de Jumps, según si presentaban o no AEA en sus primeras etapas, con el objeto de investigar si este tipo de Jump puede ser considerado como proxy de evento severo o tendría que ser descartado. De este estudio, encontramos que el comportamiento espacial y temporal de los mismos es diferente al de aquellos Jumps con AEA en todas sus etapas, los cuales tienen un ciclo diario bastante parecido al de los datos en general. Los Jumps sin AEA en sus primeras etapas tiene un máximo en la frecuencia de Jumps para las 19 horas, y un mínimo para las 6 de la mañana, mientras que los Jumps con AEA en todas sus etapas tiene un máximo para las 22 horas y un mínimo a las 15 horas. Debido a la poca cantidad de datos y a que estos dos grupos se comportan de manera muy diferente creemos que no podemos decidir en esta instancia si descartar o no a uno de los grupos debido a que seguramente esta diferencia sea por la microfísica de las descargas en las diferentes etapas por lo que esta línea de investigación se seguirá trabajando en el doctorado.

Por último, nos interesó saber la relación, si es que existía, entre la topografía y los Jumps, donde encontramos que la máxima frecuencia de Jumps para dos de las tres zonas analizadas, se da en las laderas de las montañas y sierras. Es decir al momento en que la topografía comienza a disminuir se producen las mayores frecuencias de Jumps. Esto está en concordancia con el trabajo de Bürguesser y otros 2013[8] en el estudio de la AEA en África. La tercer zona, Santa Fé, se encuentra en una zona baja, cercana a la cuenca del Río Paraná.

Con respecto a RELAMPAGO, el trabajo en esta campaña nos permitió validar GeoRayos, con 28

avisos positivos de 40 eventos reportados entre los días 10 y 11 de noviembre. De estos 28 positivos, 17 correspondientes a Granizos y 11 a lluvias intensas. Si bien se necesitaría hacer un análisis con mucha más cantidad de datos, podemos concluir con este estudio que en general los Jumps serían precesores de estos tipos de eventos, con un anterioridad promedio de 33 minutos y una distancia promedio de 19 kilómetros entre el Jump y el evento severo. Todo el trabajo aca presentado, me ha abierto un amplio camino en el estudio de variables meteorológicas de manera no clásica. Exploré muchas herramientas de geoestadística, así como herramientas de software que estoy segura me ayudaran a esta nueva etapa que comienza con mi beca doctoral de CONICET cuyo título es: “Estudio de la Actividad Eléctrica Atmosférica en Argentina como marcador de eventos extremos dentro del marco de Cambio Climático”.

Bibliografía

Bibliografía

- [1] Abarca, SF, Corbosiero, KL, Galarneau, TJ. 2010. An evaluation of the world wide lightning location network (WWLLN) using the national lightning detection network (NLDN) as ground truth. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115 (D18).
- [2] Abreu, D, Chandan, D, Holzworth, RH, Strong, K. 2010. A performance assessment of the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) via comparison with the Canadian Lightning Detection Network (CLDN). *Atmospheric Measurement Techniques*, 3(4), 1143-1153.
- [3] A. Pessi, S. Businger, K. L. Cummins, N. W. S. Demetriades, M. Murphy, B. Pifer, Development of a Long-Range Lightning Detection Network for the Pacific: Construction, Calibration, and Performance, *J. Atmo. and Oceanic Tech.*, vol. 26, doi: 10.1175/2008JTECHA1132.1, pp. 147, 2009.
- [4] Altinger, M.L. 1982, Severe Storms and tornadoes in Argentina, 12th Conf. on Severe Local Storms, San Antonio, TX. Amer. Meteor. Soc, pp. 192-196.
- [5] Ávila, E.E., Bürgesser, R.E., Castellano, N.E., Collier, A.B., Compagnucci, R.H., Hughes, A.R.W, 2010. Correlations between deep convection and lightning activity on a global scale. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 72 (14–15), 1114–1121.
- [6] Ávila, E.E., Bürgesser, R.E., Castellano, N.E.;M. Gabriela Nicora. Diurnal patterns in lightning activity over South America. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH.: AMER GEOPHYSICAL UNION.* 2015 vol.120 número. p3103 - 3113. issn 0148-0227+
- [7] Blakeslee, R. J., Mach, D. M., Bateman, M. G., and Bailey, J. C. , 2012. Seasonal variations in the lightning diurnal cycle and implications for the global electric circuit. *Atmospheric Research*, 135-136228-243, 2012
- [8] Bürgesser, RE, MG Nicora, y EE Ávila, 2013: la distribución espacial y temporal de la tasa de desarrollo rápido sobre África tropical. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Física* , 94, 41-48.
- [9] Bürgesser, R. E. (2017), Assessment of the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) detection efficiency by comparison to the Lightning Imaging Sensor (LIS), *Q. J. R. Meteorol. Soc.*
- [10] Carey, L. D., and S. A. Rutledge, 1996: A multiparameter radar case study of the microphysical and kinematic evolution of a lightning producing storm. *Meteor. Atmos. Phys.*, 59, 33-64.

- [11] Carey, L. D., and S. A. Rutledge, 1998: Electrical and multiparameter radar observations of a severe hailstorm. *J. Geophys. Res.*, 103, 13 979-14 000.
- [12] Cecil Daniel J. , Dennis E. Buechler and Richard J. Blakeslee, 2012. Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset description. *Atmospheric Research* 135–136 (2014) 404–414, 2012
- [13] Cecel, D. J. y C. B. Blankenship (2012), Toward a Global Climatology of Severe Hailstorms as Estimated by Satellite Passive Microwave Imagers, *J. Climate*, 25, 687-703.
- [14] Dowden, RL, Brudenell, JB, Rodger, CJ. 2002. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64(7), 817-830. doi:[https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00085-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00085-8).
- [15] Dowden Richard L, Brundell James B y Rodger Craig 2008 [12]
- [16] Ester, Martin; Kriegel, Hans-Peter; Sander, Jörg; Xu, Xiaowei (1996). Simoudis, Evangelos; Han, Jiawei; Fayyad, Usama M., eds. "A densitybased algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise". *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)*. AAAI Press. pp. 226–231. ISBN 1-57735-004-9. CiteSeerX: 10.
- [17] Gatlin, P. N. and S. J. Goodman, 2010: A total lightning trending algorithm to identify severe thunderstorms. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 27, 3-22.
- [18] Hutchins, M., R. Holzworth, J. Brundell, and C. Rodger, 2012, Relative detection efficiency of the world wide lightning location network, *Radio Science*, 47, doi 10.1029/2012RS005049.
- [19] Lindanger, Anders 2018. "Search for Terrestrial Gamma-ray Flashes in AGILE data by correlation with ground-based lightning measurements". Master Thesis in Space Physics. pp . 14.
- [20] Lhermitte, R.M., Williams, E.R., 1985. Thunderstorm electrification: a case study. *Journal of Geophysical Research* 90, 6071–6078.
- [21] Nicora M. Gabriela, *Actividad Eléctrica Atmosférica en Sudamérica*. Tesis doctoral Dr. en Geofísica. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/42231> Institución: Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
- [22] Nicora, M.G., Quel, E.J., Bürgesser, R.E., Ávila, E.E., Rosales, A., Salvador, J.O. y D'Elia, R.(2014). La Actividad eléctrica atmosférica en Argentina. Estimación de la tasa de mortalidad anual pro-acción de caídas de rayos. *Anales AFA*. Vol. 25 N. 4. (151- 156).
- [23] Nicora M. G; Bali J. L., Vasquez P. ;Ávila E. E.; Sacco M.; D'Elia R.; Acquesta A.; Rivaben N. *GeoRayos a new application for severe weather warning*. Brasil. Sao Pablo. 2015. Libro. Artículo Completo. Simposio. International Symposium on Lightning Protection. IEE. ISBN 978-1-5090-6052-8

- [24] Nicora M. Gabriela, Bali J. Lucas, Ávila Eldo E., Villagrán A. Constanza , 2018, Study of the Atmospheric Electrical Activity through Lightning Jump in the central Argentina, The International Lightning Detection Conference (ILDC) and International Lightning Meteorology Conference (ILMC) a presentar en marzo 2018.
- [25] Petersen, W.A., Rutledge, S.A., Cifelli, R.C., Ferrier, B.S., Smull, B.F., 1999. Shipborne dual-Doppler operations during TOGA COARE: integrated observations of storm kinematics and electrification. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80 (1), 81–96.
- [26] Price, C. 2013, Lightning Applications in Weather and Climate, *Surv Geophys*
- [27] Rasmussen, K. L., y R. A. Houze, Jr. (2011), Orographic convection in subtropical South America as seen by the TRMM satellite, *Mon. Wea. Rev.*, 139, 2399-2420.
- [28] Rasmussen, K. L., M. D. Zuluaga, and R. A. Houze Jr. (2014), Severe convection and lightning in subtropical South America, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 7359–7366, doi:10.1002/2014GL061767
- [29] Rakov, V. A., and M. A. Uman (2003), *Lightning: Physics and Effects*, The Press Syndicate of the University of Cambridge, The Pitt Building, Trumpington Street, Cambridge, United Kingdom.
- [30] Rodger, CJ, Brundell, JB, Holzworth, RH, Lay, EH, Crosby, NB, Huang, TY, Rycroft, Mj. 2009, April. Growing detection efficiency of the world wide lightning location network. In *AIP Conf. Proc*, Vol. 1118, No. 118, pp. 15-20.
- [31] Rudlosky, S. D., and D. T. Shea (2013), Evaluating WWLLN performance relative to TRMM/LIS, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2344–2348, doi:10.1002/grl.50428.
- [32] Schultz, c. J.m W. A. Petersen, and L. D. Carey, 2009: Preliminary development and evaluation of lightning jump algorithms for the real time detection of severe weather. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48, 2543-2563.
- [33] Schultz, Christopher J., Walter A. Petersen, and Lawrence D. Carey, 2011, Lightning and Severe Weather: A Comparison between Total and Cloud-to-Ground Lightning Trends. *Weather and Forecasting* 26.5.
- [34] Vidal L., Convección extrema sobre Sudamérica: estructura interna, ciclos de vida e influencia de la topografía en la iniciación. Tesis 2014
- [35] Villagrán Asiares C.; M. G. Nicora; Jonathan Quiroga; Jacobo Salvador. Primeras mediciones de Resonancia de Schumann en Argentina. Argentina. 2017. Congreso. XXVIII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas (AAGG).
- [36] Virts, K. S., J. M. Wallace, M. L. Hutchins, and R. H. Holzworth, 2013, Highlights of a new ground-based, hourly global lightning climatology. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 94, 1381–1391. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00082.1>
- [37] Wiens, K. C., S. A. Rutledge, and S. A. Tessendorf, 2005: The 29 June 2000 supercell observed during STEPS. Part II: Lightning and charge structure. *J. Atmos. Sci.*, 62, 4151-4177.

- [38] Williams ER, Weber ME, Orville RE, 1989, The relationship between lightning type and convective state of thunderstorms. *J Geophys Res* 94:13213–13220
- [39] Williams, E.R., 1994. Global circuit response to seasonal variations in global surface air temperature. *Monthly Weather Review* 172, 1917–1929.
- [40] Williams ER et al, 1999, The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms. *AtmosRes* 51:245–265
- [41] Williams ER (2001) The electrification of severe storms. In C. A. Dowswell III (ed) *Severe Convective Storms*. American Meteorological Society, AMS Monographs, Boston, pp 527–561
- [42] Williams, E.R., Mareev, E., 2013, Recent Progress on the Global Electrical Circuit, *Atmospheric Research*, doi:10.1016/j.atmosres.2013.05.015
- [43] Zipser, E. J., D. J. Cecil, C. Liu, S. W. Nesbitt, and D. P. Yorty, 2006: Where are the most intense thunderstorms on Earth? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 87, 1057–1071.