

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

PRACTICA SUPERVISADA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

“COLABORACIÓN ABIERTA DISTRIBUIDA (CROWDSOURCING) PARA
OPTIMIZAR LA DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA E
HIDRO-METEOROLÓGICA”

AUTOR: BARBERO, FRANCISCO

TUTOR INTERNO: PhD. Ing. GARCÍA, CARLOS MARCELO

SUPERVISOR EXTERNO: MsCs. Ing. ALVAREZ, JAVIER

AÑO 2019

ÍNDICE

1	ASPECTOS GENERALES	9
1.1	Marco Referencial	9
1.2	Motivación del trabajo	9
1.3	Introducción	10
1.4	Área de estudio	11
1.5	Objetivos	12
1.5.1	Objetivo General	12
1.5.2	Objetivos Particulares	12
2	ANÁLISIS DE DATOS.....	13
2.1	Introducción	13
2.2	Recopilación de información meteorológica	14
2.2.1	Fuentes de datos	14
2.2.2	Variables hidro-meteorológicas analizadas	18
2.2.3	Período de estudio	21
2.3	Análisis de Datos Meteorológicos	22
2.3.1	Comparación de fuentes de datos	32
2.4	Síntesis.....	35
3	RIESGO DE INCENDIO	37
3.1	Introducción	37
3.2	Metodología	39
3.2.1	Influencia de las variables hidro-meteorológicas en los incendios.....	40
3.2.2	Épocas de ocurrencia de incendios	42
3.2.3	Índices de peligro de incendio.....	43
3.3	Resultados	46
3.4	Síntesis.....	53
4	MODELACIÓN HIDROLÓGICA	55
4.1	Introducción	55
4.2	Modelos numéricos hidráulicos utilizados.....	55
4.2.1	HEC – RAS 5.0.5	55
4.2.2	HEC – HMS.....	62
4.3	Resultados.....	65
4.3.1	HEC-RAS.....	65
4.3.2	HEC-HMS	69
4.4	Síntesis.....	72
5	CONCLUSIONES	73

6 BIBLIOGRAFÍA..... 75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Área de Estudio.	12
Figura 2: Disposición de estaciones en plataforma online ubicadas en el área de estudio.....	14
Figura 3: Estaciones Meteorológicas Automáticas de MeteoStar.	15
Figura 4: Estaciones instaladas por el INA-CIRSA.....	16
Figura 5: Estación instalada por el Ministerio de Agricultura de la provincia de Córdoba.....	17
Figura 6: Variables disponibles para descarga de datos en plataforma online.	18
Figura 7: Ejemplo de tabla de datos para descarga. Estación "IPUNILLA5". Día 12/11/2018. ...	22
Figura 8: Estaciones meteorológicas ubicadas en el área de estudio. Diferenciando estaciones Oficiales y No-oficiales.	23
Figura 9: Cantidad de estaciones Oficiales y No-oficiales que registran datos de precipitación en la zona de estudio, a partir del mes de agosto del año 2016.	24
Figura 10: Temperatura media diaria registrada en el período 07/2016 - 07/2018.....	25
Figura 11: Temperatura media diaria registrada en el período anual 03/2017 - 03/2018.....	26
Figura 12: Temperatura media diaria registrada en el período mensual 03/2017.....	26
Figura 13: Presión media diaria registrada en el período 07/2016 - 07/2018.....	27
Figura 14: Presión media diaria registrada en el período anual 03/2017 - 03/2018.....	27
Figura 15: Presión media diaria registrada en el período mensual 03/2017.....	28
Figura 16: Precipitación media diaria registrada en el período 06/2016 - 06/2018.....	29
Figura 17: Precipitación acumulada registrada en el período anual 09/2017 - 09/2018.	29
Figura 18: Precipitación acumulada registrada en el período mensual 05/2018.	30
Figura 19: Precipitación acumulada registrada en el día 08/05/2018.	31
Figura 20: Análisis de correlación entre la precipitación y el viento.	32
Figura 21: Comparación de datos de precipitaciones aisladas.	33
Figura 22: Error porcentual en los registros de precipitaciones aisladas.	34
Figura 23: Error absoluto en los registros de precipitaciones aisladas.....	34
Figura 24: Artículos periodísticos extraídos del sitio La Voz del Interior.	37
Figura 25: Esquema evolutivo de un Incendio.	38
Figura 26: Ubicación de estaciones utilizadas para la determinación de los Índices de Incendio.	40
Figura 27: Índice de Nesterov en el período 07/2016 - 07/2018.....	46
Figura 28: Índice de Monte Alegre en el período 07/2016 - 07/2018.	47
Figura 29: Índice de Tellysin en el período 07/2016 - 07/2018.	48
Figura 30: Índice de Nesterov en el período anual 06/2017 - 06/2018.....	48
Figura 31: Índice de Monte Alegre en el período anual 06/2017 - 06/2018.	49
Figura 32: Índice de Tellysin en el período anual 06/2017 - 06/2018.....	49
Figura 33: Porcentaje de días previstos con cada rango de peligro en la estación "ICORDOBA26".....	51
Figura 34: Porcentaje de días previstos con cada rango de peligro en la estación "ICORDOBA28".....	51
Figura 35: Porcentaje de días previstos en cada rango de peligro en la estación "ICRDOBAL3".	52
Figura 36: Porcentaje de días previstos en cada rango de peligro en la estación "ICRDOBAV16".	53
Figura 37: Mapa Índice de Monte Alegre.....	53
Figura 38: Mapa Índice de Nesterov.	53
Figura 39: Áreas de influencia de estaciones Oficiales.	59

Figura 40: Delimitación de áreas de influencia en el modelo de elevación digital.....	59
Figura 41: Áreas de influencia de todas las estaciones disponibles.	60
Figura 42: Delimitación de áreas de influencia en el modelo de elevación digital.....	60
Figura 43: Áreas de influencia de estaciones Oficiales.	61
Figura 44: Delimitación de áreas de influencia en el modelo de elevación digital.....	61
Figura 45: Áreas de influencia de todas las estaciones disponibles.	62
Figura 46: Delimitación de áreas de influencia en el modelo de elevación digital.....	62
Figura 47: Delimitación de las subcuencas obtenida del modelo utilizado.	64
Figura 48: Superposición de las áreas de influencia de las estaciones en las subcuencas delimitadas. Izquierda: Estaciones Oficiales. Centro: Estaciones No-oficiales. Derecha: Estaciones Oficiales y No-oficiales.	65
Figura 49: Resultados de profundidades máximas para precipitaciones registradas el día 08/05 por estaciones Oficiales.	65
Figura 50: Resultados de velocidades máximas para precipitaciones registradas el día 08/05 por estaciones Oficiales.	66
Figura 51: Resultados de profundidades máximas para precipitaciones registradas el día 08/05 por estaciones Oficiales y No-oficiales.....	66
Figura 52: Resultados de velocidades máximas para precipitaciones registradas el día 08/05 por estaciones Oficiales y No-oficiales.	67
Figura 53: Resultados de profundidades máximas para precipitaciones registradas el día 12/11 por estaciones Oficiales.	67
Figura 54: Resultados de velocidades máximas para precipitaciones registradas el día 12/11 por estaciones Oficiales.....	68
Figura 55: Resultados de profundidades máximas para precipitaciones registradas el día 12/11 por estaciones Oficiales y No-oficiales.....	68
Figura 56: Resultados de velocidades máximas para precipitaciones registradas el día 12/11 por estaciones Oficiales y No-oficiales.	69
Figura 57: Resultados de la modelación de cauce utilizando las precipitaciones registradas en estaciones Oficiales.	70
Figura 58: Resultados de la modelación de cauce utilizando las precipitaciones registradas en estaciones Oficiales.....	70
Figura 59: Resultados de la modelación de cauce utilizando las precipitaciones registradas en estaciones No-oficiales.....	70
Figura 60: Resultados de la modelación de cauce utilizando las precipitaciones registradas en estaciones No-oficiales.....	71
Figura 61: Resultados de la modelación de cauce utilizando las precipitaciones registradas en estaciones Oficiales y No-oficiales.	71
Figura 62: Resultados de la modelación de cauce utilizando las precipitaciones registradas en estaciones Oficiales y No-oficiales.	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estaciones pertenecientes al SMN ubicadas en la provincia de Córdoba.....	17
Tabla 2: Estaciones utilizadas para los análisis de las variables.....	24
Tabla 3: Escalas de peligro para el Índice de Nesterov.....	45
Tabla 4: Escalas de peligro para el Índice de Monte Alegre.....	46
Tabla 5: Número de días correspondientes a cada rango de peligro.....	50
Tabla 6: Porcentaje de días correspondientes a cada rango de peligro.....	50
Tabla 7: Estaciones utilizadas para la modelación.....	58

1 ASPECTOS GENERALES

1.1 Marco Referencial

Para abordar la temática propia del trabajo, resulta necesario hacer mención sobre los estudios realizados anteriormente.

En primer lugar, el Centro de la Región Semiárida (CIRSA) del Instituto Nacional del Agua, ha realizado numerosos anuarios pluviométricos y de temperaturas sobre los principales ríos que afluyen al Dique San Roque.

En segundo lugar, la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba (UTN-FRC), en conjunto con la Administración Provincial de Recursos Hídricos (APRHi) del Ministerio de Agua Ambiente y Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba, emprendieron la evaluación y calibración de aquellos pluviómetros más utilizados por las instituciones públicas en la Provincia de Córdoba. En este trabajo, realizaron un análisis experimental de la exactitud, precisión y sensibilidad de tres (3) pluviómetros de alta frecuencia (PAF) -denominados (por sus marcas comerciales) Davis, Tecmes Alto y Tecmes Bajo-, junto con un pluviómetro universal tipo "B", sometidos a precipitaciones simuladas bajo un simulador de lluvia portátil (denominado Tipo B) disponible en el Laboratorio de Hidráulica de la UTN-FRC.

Por último, el proyecto MATTEO (Monitoreo Automático del Tiempo en Escuelas y Organismos) creado a la memoria de Matteo Ravagli Cáceres con fines educativos, se ha implementado en los últimos dos años en más de 30 establecimientos educativos e instituciones públicas de la provincia de Córdoba. Este proyecto ha alcanzado tal envergadura, que ha sido adoptado como brazo educativo del Proyecto Relámpago, del Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos y como compromiso social estudiantil de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

Los avances realizados en estos trabajos resultaron en un pilar fuerte para la ejecución de esta práctica supervisada.

1.2 Motivación del trabajo

Como se describió anteriormente, el presente trabajo se basa en estudios previos realizados en las temáticas de monitoreo de precipitaciones en la Provincia de Córdoba.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la información hidro-meteorológica abierta y distribuida para su uso de manera complementaria en aplicaciones hidrológicas e hidro-meteorológicas. En particular, se evalúan datos generados en el proyecto MATTEO, que se ha implementado, en más de 30 establecimientos educativos de la provincia de Córdoba en menos de 3 años.

1.3 Introducción

La colaboración abierta y distribuida, también definido como “crowdsourcing” en inglés, se define tradicionalmente como la obtención de datos o información provenientes de un número (potencialmente grande) de personas (Muller et al, 2015). Este término, recientemente ha cobrado mucha popularidad en el ámbito científico, debido a que las innovaciones tecnológicas recientes, permiten obtener una gran cantidad de datos de una amplia variedad de fuentes no-convencionales con buena precisión: desde sensores de teléfonos inteligentes hasta estaciones meteorológicas de aficionados o encuestas a miembros del público.

Si bien algunas disciplinas ya están aplicando estas técnicas (por ejemplo, astrofísica, ecología), su aplicación dentro de las disciplinas de ciencias de la tierra, del clima y la atmósfera todavía está relativamente sin explorar. En particular, para diseñar y administrar ciudades que estén preparadas para lidiar con el número creciente de eventos de lluvia extrema que se espera en el futuro, se requieren datos de lluvia con resoluciones temporales y espaciales más altas que las necesarias para las cuencas rurales (Witze et al., 2018) ya que las áreas urbanas son más vulnerables a fenómenos climáticos extremos (mayor densidad de áreas edificadas y mayor impermeabilidad), lo que puede provocar daños considerables e impactar en un gran número de personas.

Por otra parte, la densidad de redes hidro-meteorológicas operacionales administradas por las autoridades locales o nacionales son típicamente bajas en áreas urbanas. Sin embargo, en los últimos años se ha observado un número creciente de estaciones meteorológicas instaladas por personas ajenas a instituciones meteorológicas, cuyos datos son accesibles a través de plataformas web sin costo.

Resulta evidente que el *crowdsourcing* ya es una herramienta valiosa para involucrar al público, y si se adoptan e implementan procedimientos adecuados de validación y control de calidad, tiene gran potencial para proporcionar una fuente valiosa de alta resolución temporal y espacial, datos en tiempo real, especialmente en regiones donde actualmente existen pocas observaciones.

Es por esto que el objetivo del presente trabajo es evaluar la información hidro-meteorológica abierta y distribuida, para su uso de manera complementaria en aplicaciones hidrológicas e hidro-meteorológicas. En particular, evaluar datos generados en el proyecto MATTEO (Monitoreo Automático del Tiempo en Escuelas y Organismos) dedicado a la memoria de Matteo Ravagli Cáceres, que se está implementando en más de 30 establecimientos educativos de la provincia de Córdoba.

Se analizaron los datos obtenidos por las estaciones hidro-meteorológicas de instituciones oficiales (llamadas en este trabajo estaciones *Oficiales*) como el Instituto Nacional del Agua, el Servicio Meteorológico Nacional en Córdoba Capital, diferentes municipalidades y ministerios provinciales. Estas instituciones han implementado diferentes herramientas informáticas para el acceso y análisis de información que facilitan las tareas de los usuarios, como pueden ser mapas de observación de las estaciones en la zona y herramientas de descarga de datos a intervalos específicos de tiempo.

A estas estaciones oficiales se agregaron las estaciones hidrometeorológicas de colaboración abierta y distribuida (generalmente de bajo costo, llamadas aquí *No-*

oficiales) colocadas en los últimos años, como, por ejemplo, estaciones instaladas por particulares y estaciones instaladas en el marco del proyecto MATTEO.

Para llevar a cabo el estudio, se analizaron datos de estaciones oficiales y no oficiales en intervalos de tiempo específicos para organizar los datos disponibles. Se tomaron ventanas más generales a partir del año 2017 donde se comenzaron a disponer de más estaciones no oficiales de bajo costo.

Por último, en este trabajo se estudia la aplicación de los datos analizados, provenientes de fuentes no-oficiales, con fines de modelación hidrológica y evaluación del riesgo de incendio.

1.4 Área de estudio

En las diferentes aplicaciones de este informe se hace principal hincapié en la ciudad de Villa Carlos Paz y su entorno. Esta ciudad se encuentra al Oeste de la Capital cordobesa, a unos 36 Km de distancia, dentro del departamento de Punilla, en el valle de Punilla. El cual está definido entre los dos cordones montañosos que atraviesan la provincia de Córdoba, sierras grandes y las sierras chicas. El clima que caracteriza a dicho valle es templado, donde se diferencian claramente las estaciones del año.

Villa Carlos Paz es una ciudad de gran relevancia turística e industrial para la región que se ubica en la cuenca de aporte del embalse del dique San Roque, el cuál es uno de los reservorios artificiales más importantes de la provincia de Córdoba. En las costas de este embalse se han desarrollado otros centros urbanos, como lo son, Bialeto Massé, Villa Parque Síquiman, Villa Santa Cruz del Lago y San Roque. En la Figura 1 se presenta la zona de estudio y su proximidad a la ciudad de Córdoba y al lago San Roque, cuyos principales tributarios son los ríos Cosquín, San Antonio, Las Mojaras y Los Chorrillos.

Esta presa de hormigón permite almacenar 190 Hm³, con un caudal medio anual ingresante de 11 m³/s (datos desde 1947 a 2016), aunque se han observado crecidas de hasta 6425 m³/s asociadas a precipitaciones intensas. El dique fue concebido originalmente para proteger a la Ciudad de Córdoba ante extremos hídricos. Es decir, fue diseñado con objetivos como almacenamiento de agua de lluvias en épocas estivas (proveyendo de agua potable a la ciudad de Córdoba todo el año) y atenuación de crecientes torrenciales asociadas a precipitaciones intensas en su cuenca. A su vez, con el tiempo se han ido estableciendo otros usos como Generación de Energía Hidroeléctrica, Pesca, Vertidos de Efluentes Sanitarios, Recreación y Turismo, Urbanización en las márgenes, entre otros. Debido a los múltiples usos es fundamental optimizar la gestión y administrar el recurso hídrico, maximizando su aprovechamiento.

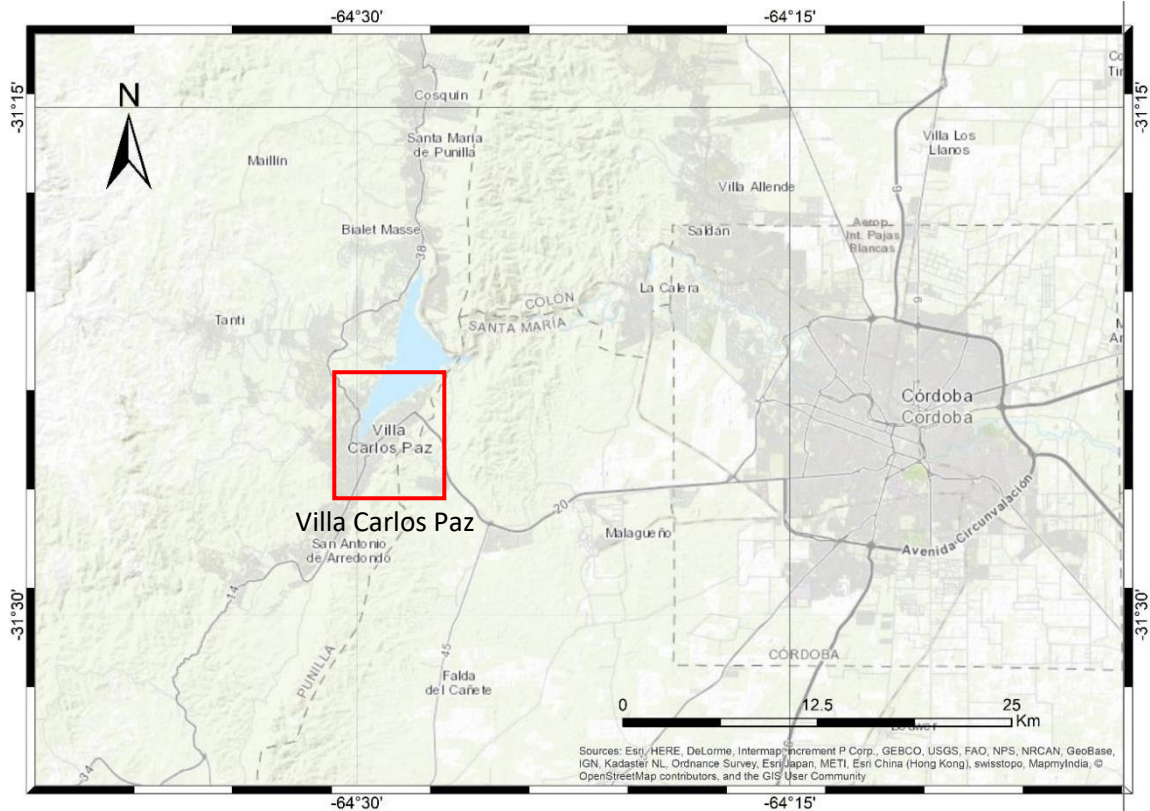


Figura 1: Área de Estudio.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Evaluar la información hidro-meteorológica abierta y distribuida para su uso de manera complementaria en aplicaciones hidrológicas e hidro-meteorológicas.

1.5.2 Objetivos Particulares

- Recopilar datos de distintas fuentes meteorológicas.
- Procesar los datos de distintas fuentes y evaluar su calidad.
- Generar una metodología para el procesamiento y validación de datos meteorológicos.
- Evaluar la aplicabilidad de los datos en aplicaciones de amenazas de incendio.
- Evaluar la aplicabilidad de los datos en aplicaciones hidrológicas.

2 ANÁLISIS DE DATOS

2.1 Introducción

Como se enunció en el capítulo anterior, la densidad de redes hidro-meteorológicas operacionales administradas por las autoridades locales o nacionales generalmente es baja en áreas urbanas. Aunque, en los últimos años, se ha observado un cambio en esta tendencia, siendo cada vez mayor la cantidad de estaciones meteorológicas instaladas por personas ajenas a instituciones meteorológicas. Con la particularidad que estos datos se encuentran accesibles a través de plataformas web sin costo, gracias al advenimiento del *internet de las cosas* (en inglés, *Internet of Things* o “*IoT*”).

El auge en la disponibilidad de datos a través de internet, ha aumentado el rango de aplicaciones de los datos meteorológicos, siendo las siguientes algunas de las posibles aplicaciones de estos datos:

- Agropecuarias/Rurales/Criaderos de aves
- Pulverizadoras móviles terrestres y Aero Aplicadores
- Alertas Tempranas: inundaciones, crecidas e incendios forestales
- Seguridad Vial
- Compañías Aseguradoras
- Clubes - Aeródromos - Náutica - Embarcaciones
- Turismo - Hoteles
- Industrias
- Universidades, Colegios y Escuelas Agropecuarias
- Reparticiones Públicas- Bomberos
- Minería, Torres de construcción y Edificios
- Domésticas
- Empresas

Si bien las estaciones meteorológicas *Oficiales* y *No-oficiales* poseen sensores y aplicaciones similares, las principales diferencias entre las estaciones yacen, por un lado, en los materiales empleados en la construcción de los componentes de las estaciones y, por otro lado, en la frecuencia del mantenimiento que reciben. Para evaluar si estas diferencias habrían impactado en las observaciones meteorológicas, en el presente capítulo se estudia la calidad de cada fuente de datos respecto a cada una de las principales variables observadas.

Es así cómo, a continuación, se presenta un análisis comparativo de los datos de las diferentes fuentes en diversas ventanas de tiempo, con el fin de hacer evaluaciones generales y específicas de eventos extremos. Del mismo modo, se comparan los datos de diferentes estaciones tomando como referencia a la estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional en Córdoba.

2.2 Recopilación de información meteorológica

2.2.1 Fuentes de datos

Para realizar el análisis se cuenta principalmente con dos tipos de datos: aquellos provenientes de las estaciones de bajo costo obtenidos a través de la plataforma online Weather Underground definidos a partir de ahora como datos *No-oficiales*, y aquellos que se obtienen de estaciones colocadas por organismos e instituciones de monitoreo permanente (INA-CIRSA, SMN y MSP-Cba), que serán definidos como datos *Oficiales*.

Los datos *No-oficiales* se obtienen con intervalos de tiempo irregulares y no poseen una verificación o análisis previo, por lo que pueden contener valores de datos erróneos. En cambio, las instituciones especializadas en meteorología, poseen diversas herramientas que facilitan la interacción de los usuarios con las bases de datos, ya sea mediante mapas interactivos o herramientas de descarga en diversos intervalos de tiempo. Estas diferencias son muy importantes no solo en la calidad de los datos, sino al brindar la información al usuario en el formato deseado, salvando así potenciales errores de una mala gestión de los datos.

2.2.1.1 Datos No-Oficiales

El servidor web “Weather Underground” se define como una perspectiva alternativa que ha desafiado a las formas convencionales de compartir información con el público a partir del año 1993. En este sitio web se han creado diferentes productos para mejorar el acceso de la gente a datos significativos del clima de todo el mundo. Uno de ellos es el primer servicio meteorológico de internet, considerándose pioneros en este campo y, buscando constantemente nuevos conjuntos de datos y tecnologías que ayuden a compartir los datos con más personas.

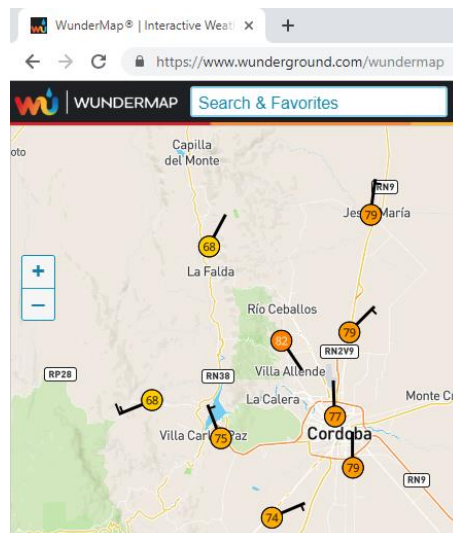


Figura 2: Disposición de estaciones en plataforma online ubicadas en el área de estudio.

Esta compañía cuenta con una comunidad de más de 250.000 miembros que comparten datos y contenidos a través de productos. Los datos son enviados en tiempo real desde sus propias estaciones proporcionando la extensa información en el mundo.

La mayoría de las estaciones meteorológicas *No-oficiales* utilizadas en la zona de estudio se encuentran en este servidor web y pertenecen al Proyecto “MATTEO”. Este proyecto, ha instalado más de 30 estaciones hasta la fecha en toda la Provincia de Córdoba y han sido compradas al proveedor “MeteoStar”. A continuación, se describen las principales características de estas estaciones:



Figura 3: Estaciones Meteorológicas Automáticas de MeteoStar.

Las estaciones Meteorológicas Automáticas de bajo costo de MeteoStar que se muestran en la Figura 3, son similares a las estaciones que utilizan los usuarios privados de los cuales se dispone acceso a través de plataformas web como Weather Underground. En general, estas estaciones cuentan con los siguientes sensores:

- Sensor de velocidad del viento (Anemómetro con mejor diseño)
- Sensor de dirección del viento (Veleta)
- Sensor de Humedad Relativa Externa
- Sensor de Temperatura Externa
- Sensor de Temperatura Interna
- Sensor de Humedad Interna
- Sensor de Presión Atmosférica
- Sensor de Lluvia: Pluviómetro de Alta Frecuencia “PAF”
- Medición del Punto de Rocío
- Medición de Sensación Térmica
- Tendencia del Clima
- Generación de Alarmas

Por último, dentro del proyecto MATTEO se ha comenzado a instalar, conjuntamente a las estaciones antes descritas, pluviómetros totalizadores de bajo costo que, al no ser electrónicos, sus datos son recolectados manualmente y por ende no están en el servidor web de Weather Underground.

2.2.1.2 Datos Oficiales

Dentro del grupo de estaciones meteorológicas de fuentes oficiales se encuentran el Sistema Telemétrico del Instituto Nacional del Agua – Centro de la Región Semiárida (INA-CIRSA), el Servicio Meteorológico Nacional y el Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Córdoba.

El INA por intermedio del Centro de la Región Semiárida (CIRSA) dispone de un sistema de medición que proporciona una herramienta para alerta hidrológica en distintas áreas de la provincia y, posibilita la obtención de datos hidrológicos de interés para investigación. El Sistema Telemétrico CIRSA (STC) tiene un desarrollo de más de dos décadas de experiencias acumuladas. La conformación actual de la red telemétrica dispone de 12 Estaciones Pluviométricas de las cuales 5 presentan sensores de nivel (Limnimétricas) en la Cuenca del Río San Antonio y cuenta con 11 Estaciones Pluviométricas más en otras cuencas (lateral Lago San Roque, Río Cosquín, Río de la Suela, Río Mina Cravero, Río Panaholma, e inferior el Río Xanaes y otras). La transmisión de datos es por telemetría, contando con dos estaciones repetidoras y una Estación Central (EC) de procesamiento.

En general las características de las estaciones de la red INA-CIRSA son similares a las de Weather Underground. Sin embargo, cada componente es construido con una calidad superior a las anteriores, resultando en un costo sustancialmente mayor. A continuación, se muestran algunas imágenes.



Figura 4: Estaciones instaladas por el INA-CIRSA.

Por otra parte, el Servicio Meteorológico Nacional, es un organismo nacional descentralizado creado por el decreto 1432/2007. Este cuenta con diversos artículos referidos a la competencia y funciones del organismo. En particular, en el Artículo N° 3, se destacan las siguientes funciones:

- “Proveer y mantener los sistemas de recopilación y control de calidad de los datos de observación en un BANCO NACIONAL DE DATOS METEOROLOGICOS Y AMBIENTALES, y procesarlos para la provisión de servicios meteorológicos y climatológicos en tiempo real, y de servicios medioambientales relacionados, y organizar el registro climatológico nacional.”
- “Planificar, mantener y operar las redes de observación convencionales y no convencionales sobre el territorio nacional y océanos adyacentes.”

Para realizar los diferentes análisis se dispone de un gran número de estaciones de monitoreo en Argentina, algunas de ellas dentro de la provincia de Córdoba, las cuales se listan a continuación.

Tabla 1: Estaciones pertenecientes al SMN ubicadas en la provincia de Córdoba.

Nombre	N°	Ubicación	Altitud msnm
Córdoba Aero	87344	31°19'S 64°10'O	474
Córdoba Observatorio	87345	31°24'S 64°10'O	425
Escuela Aviación Militar	87347	31°27'S 64°20'O	502
Laboulaye Aero	87534	34°08'S 63°20'O	137
Marcos Juárez Aero	87467	32°42'S 62°10'O	114
Pilar Observatorio	87349	31°40'S 63°53'O	338
Río Cuarto Aero	87453	33°07'S 64°10'O	420
Villa Dolores Aero	87328	31°57'S 65°10'O	569
Villa María del Río Seco	87244	29°54'S 63°40'O	341

Debido a la cercanía con la zona de estudio, para realizar las diferentes comparaciones se utilizó la estación ubicada en Córdoba Observatorio. Es importante mencionar que la misma se adoptó como estación de referencia ya que se encuentra homologada por la OMM (Organización Meteorológica Mundial).

Por último, como se mencionó anteriormente, se utilizaron los datos provenientes del Programa Red Meteorológica Provincial, que comprende al Ministerio de Servicios Públicos y al Ministerio de Agricultura y Ganadería entre otros entes del Gobierno de la Provincia de Córdoba. Dicho programa tiene como objetivo brindar y facilitar el acceso a información meteorológica, desde cualquier dispositivo y en cualquier momento.

La red cuenta con más de 40 estaciones brindando información de manera gratuita para el usuario. Esta información es dispuesta por un sistema de gestión de estaciones de Omixom.



Figura 5: Estación instalada por el Ministerio de Agricultura de la provincia de Córdoba.

2.2.2 Variables hidro-meteorológicas analizadas

En el caso de las estaciones meteorológicas no-oficiales se pueden analizar datos de temperatura, precipitaciones, humedad, presión y viento, como se puede observar a modo de ejemplo el encabezado de la web Weather Underground en la siguiente figura.

Time	Temperature	Dew Point	Humidity	Wind	Speed	Gust	Pressure	Precip. Rate.	Precip. Accum.	UV	Solar
------	-------------	-----------	----------	------	-------	------	----------	---------------	----------------	----	-------

Figura 6: Variables disponibles para descarga de datos en plataforma online.

A continuación, se hace una breve presentación de las variables meteorológicas que se estudian en el presente informe, incluyendo una breve descripción de la misma. Posteriormente, los datos fueron comparados con datos de las fuentes oficiales. Además, se realizaron comparaciones entre los valores obtenidos de las diferentes fuentes y se elaboraron conclusiones sobre la posible utilización de los mismos.

2.2.2.1 Radiación Solar

La radiación solar se define como la energía que llega a la tierra proveniente del sol, en forma de ondas electromagnéticas. Su intensidad es constante pero la cantidad de energía que llega a la superficie terrestre varía, dependiendo principalmente de las nubes en la atmósfera. Una parte de la radiación que incide en la superficie es absorbida, produciendo así un calentamiento de la misma, y otra parte es reflejada. Además, hay una porción absorbida por diferentes elementos como el vapor de agua, ozono y dióxido de carbono.

La medición de la misma se realiza utilizando un piranómetro, también llamado solarímetro y actinómetro. Este es un instrumento que consiste en un sensor diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar (kilovatios por metro cuadrado) en un campo de 180 grados, otorgando resultados muy precisos.

Al medir esta variable, es importante tener en cuenta la ubicación geográfica y la topografía del terreno analizado. Esto se debe a que la inclinación de los rayos solares varía con la latitud, estación del año, la hora del día y el relieve. La variación genera un espectro de temperaturas diferentes.

Es importante realizar mediciones de esta variable, ya que, la radiación solar influye directamente en las variaciones del tiempo, y de este modo, en el clima en la superficie terrestre. En hidrología, el conocimiento de esta variable resulta fundamental para la estimación de la evapo-transpiración real, variable fundamental y con gran incertidumbre en el ciclo hidrológico.

2.2.2.2 Temperatura

La temperatura es la cualidad de la atmósfera que indica la cantidad de energía solar retenida por el aire, además de la propiedad física que se refiere a las nociones comunes de calor o ausencia de calor. Termodinámicamente se entiende como temperatura a la

velocidad promedio o la energía cinética de las partículas de las moléculas, siendo de esta manera, a temperaturas altas, velocidad de las partículas alta.

En el caso particular de la temperatura del aire, varía fundamentalmente con la temperatura de la superficie terrestre. Esta variable se mide utilizando termómetros, los cuales pueden ser calibrados de acuerdo a una multitud de escalas que dan lugar a unidades de medición de temperatura. En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de temperatura es el Kelvin, pero fuera del ámbito científico se utilizan otras escalas como Celsius o Fahrenheit en los Estados Unidos.

Al analizar los datos, es necesario tener en cuenta la altura en la que se encuentra ubicada la estación respecto al suelo, debido a las diferencias de temperaturas que pueden generarse en el aire, por variaciones en el calentamiento de la superficie. Esto afecta tanto a los vientos locales como a las lluvias y tempestades.

Es una variable muy importante ya que conjuntamente con las precipitaciones, define el clima de las diferentes regiones.

2.2.2.3 Presión Atmosférica

La presión atmosférica se define como la ejercida sobre la superficie terrestre por la capa de aire que la circunda. Esta capa varía de acuerdo a diferentes causas como la altura topográfica, el tiempo a lo largo del día y principalmente el movimiento de las masas de aire. Existen diferentes sistemas de acuerdo a la circulación de aire, puede ser anticiclónica asociada a alta presión, o ciclónica asociada a baja presión y temperaturas más altas.

Como la densidad del aire disminuye conforme aumenta la altura de la superficie terrestre, no se puede calcular el peso de la columna de aire a menos que pudiera expresarse la variación de la densidad del aire en función de la altura o de la presión.

El instrumento utilizado para la medición de la presión es el barómetro, expresando en hectopascal los resultados. Con dicho instrumento, se puede obtener una medida de la presión atmosférica en un lugar determinado, pero de ella no se pueden sacar muchas conclusiones, sin embargo, la variación de dicha presión en el plano de la superficie terrestre permite obtener información muy útil. Tal es así que la velocidad del viento es proporcional al gradiente que se genera entre diferentes presiones, o isobaras, siempre en movimiento hacia el centro de baja presión.

2.2.2.4 Humedad Atmosférica

Existen diferentes maneras de expresar la cantidad de vapor de agua presente en una cierta muestra de aire, ya que se encuentra mezclada con otros gases:

- *Humedad relativa del aire*

La humedad relativa es una de las formas más usadas de expresar la humedad, a pesar de que tenga una dependencia importante con la temperatura. Se define como la razón, en porcentaje, entre la presión real de vapor de agua (cantidad de vapor de agua contenido en un cierto volumen de aire) y la presión máxima de vapor de agua (cantidad que este mismo volumen contendría si estuviera saturado), a una misma temperatura.

La medición de la humedad relativa se realiza utilizando un higrómetro. Por otro lado, la humedad de una mezcla de aire y vapor de agua, se determina mediante el uso de tablas psicrométricas, si se conocen tanto la temperatura del bulbo seco, como la temperatura del bulbo húmedo de la mezcla.

Las variaciones de humedad en los diferentes elementos son permanentes, ya que se producen intercambios con la atmósfera absorbiendo agua cuando la atmósfera es húmeda o liberando agua con el aire es seco. Además, esta variable presenta diferentes valores a lo largo del día. En general, los valores mínimos se dan cerca del mediodía y los máximos al amanecer, aun cuando no incide el sol. Cuando los valores son inferiores a un 30% es una situación crítica por la dificultad de controlar a un incendio forestal.

- *Temperatura del Punto de Rocío*

El punto de rocío es la temperatura a la cual el aire, enfriado bajo presión constante, se torna saturado. Es decir, la más alta temperatura a la que empieza a condensarse el vapor de agua contenido en el aire. Cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la cantidad de vapor de agua que soporte.

Existen diferentes instrumentos de medición que consisten en sensores, dependiendo el uso y las condiciones del entorno donde se va a colocar.

La medición de esta variable nos permite conocer sobre lo cerca o lo lejos que está el aire de la saturación. Es esencial en algunos sondeos para estimar cómo se distribuye verticalmente el vapor de agua en la parte baja de la atmósfera, lo que resulta fundamental, por ejemplo, para predecir la evolución de la nubosidad.

2.2.2.5 *Viento*

El viento puede definirse como el movimiento de aire debido a un gradiente de presión existente entre dos áreas. En meteorología, se denominan los vientos según su fuerza y la dirección desde la que soplan, algunos ejemplos pueden ser: ráfagas, turbonadas brisa o temporal.

Existe un movimiento general en el sentido de polos – ecuador ya que en general, en esta zona las temperaturas son superiores y, por lo tanto, son áreas de menor presión. Además, existen movimientos locales que provocan una distribución bastante compleja de los mismos en superficie. En muchas áreas los vientos locales predominan, sobreponiéndose a la circulación general de la atmósfera.

La medición de la velocidad y dirección del viento se efectúa con instrumentos registradores llamados anemómetros, que disponen de dos sensores: uno para medir la velocidad y otro para medir la dirección del mismo.

El estudio sistemático de las características del viento es muy importante para dimensionar estructuras de grandes edificios, diseñar campos de generación eólica, diseñar protección de los márgenes de embalses, entre otras aplicaciones.

2.2.2.6 Precipitación

En meteorología la precipitación es cualquier forma de hidrometeoro que cae desde la atmósfera y llega a la superficie terrestre, incluyendo lluvia, llovizna, nieve, aguanieve y granizo. Las precipitaciones presentan diferentes variaciones temporales, por lo que debe tenerse en cuenta siempre la época del año en la que se encuentra.

La precipitación pluvial se mide en mm, que sería el espesor de la lámina de agua que se formaría, a causa de la precipitación, sobre una superficie plana e impermeable y que equivale a litros de agua por metro cuadrado de terreno.

Los instrumentos utilizados para la medición son los pluviómetros y pluviógrafos, estos últimos se utilizan en general, para determinar las precipitaciones pluviales de corta duración y alta intensidad. Dentro de los pluviómetros, se encuentran los totalizadores, que registran en un recipiente graduado la cantidad de mm acumulados en 24 horas, y los pluviómetros de alta frecuencia, que cuantifican el instante de tiempo en que se produjo la acumulación de una unidad de lluvia (por lo general, registran valores como 1mm, 0.1 pulg, o similares).

En cuanto a la instalación de los instrumentos de medición de precipitación, debe garantizarse estrictamente que no existan interferencias en las proximidades del pluviómetro. La Organización Meteorológica Mundial, sobre este aspecto realiza sugerencias, como por ejemplo que se respete la zona libre de interferencias al proyectar en un ángulo de 45° el área de captación del instrumento.

El estudio de la lluvia es importante para diferentes disciplinas. En el caso de la ingeniería agrícola, es influida por factores climáticos en el riego y drenaje de cultivos. Además, muchas obras de ingeniería civil se ven profundamente influidas por los factores climáticos, destacándose las precipitaciones pluviales. En efecto, un correcto dimensionamiento del drenaje garantizará la vida útil de una carretera, vía férrea, un aeropuerto. Por otro lado, el conocimiento de las precipitaciones pluviales extremas garantizará el funcionamiento de obras como presas, y la seguridad de la población que se encuentra aguas abajo.

2.2.3 Período de estudio

Los datos provenientes de la plataforma online de Weather Underground deben ser analizados cuidadosamente ya que presentan intervalos temporales irregulares y no están sujetas a control previo (ver Figura 7). A pesar de esto, y de las complicaciones para organizar los diferentes datos, al contar con una mayor cantidad de estaciones se

pueden analizar algunas zonas específicas o estudiar fenómenos meteorológicos, con mayor detalle.

Time	Temperature	Dew Point	Humidity	Wind	Speed	Gust	Pressure	Precip. Rate.	Precip. Accum.	UV	Solar
00:03 undefined	18 °C	17 °C	96 %	WNW	0.0 km/h	0.0 km/h	1015.24 hPa	--	0.00 mm		w/m ²
00:09 undefined	18 °C	17 °C	96 %	SSW	3.0 km/h	5.0 km/h	1013.88 hPa	--	0.00 mm		w/m ²
00:13 undefined	18 °C	17 °C	96 %	SSW	2.0 km/h	4.0 km/h	1014.56 hPa	--	0.00 mm		w/m ²
00:18 undefined	18 °C	17 °C	96 %	WNW	1.0 km/h	1.0 km/h	1015.24 hPa	--	0.00 mm		w/m ²
00:24 undefined	18 °C	17 °C	97 %	SSW	0.0 km/h	0.0 km/h	1014.90 hPa	--	0.00 mm		w/m ²
00:29 undefined	18 °C	17 °C	97 %	South	4.0 km/h	5.0 km/h	1014.90 hPa	--	0.00 mm		w/m ²
00:34 undefined	18 °C	17 °C	97 %	SSW	2.0 km/h	3.0 km/h	1015.24 hPa	--	1.27 mm		w/m ²
00:36 undefined	18 °C	17 °C	97 %	SSW	6.0 km/h	7.0 km/h	1014.90 hPa	--	1.52 mm		w/m ²
00:41 undefined	18 °C	17 °C	97 %	NNE	3.0 km/h	4.0 km/h	1014.56 hPa	--	2.29 mm		w/m ²
00:49 undefined	18 °C	17 °C	97 %	SSW	7.0 km/h	9.0 km/h	1014.56 hPa	--	2.03 mm		w/m ²
00:54 undefined	17 °C	17 °C	97 %	SW	5.0 km/h	9.0 km/h	1014.56 hPa	--	2.03 mm		w/m ²
00:56 undefined	17 °C	17 °C	97 %	WNW	3.0 km/h	4.0 km/h	1013.88 hPa	--	2.03 mm		w/m ²
01:02 undefined	17 °C	17 °C	97 %	NW	2.0 km/h	2.0 km/h	1013.88 hPa	--	2.03 mm		w/m ²
01:09 undefined	17 °C	17 °C	97 %	North	2.0 km/h	4.0 km/h	1013.55 hPa	--	2.03 mm		w/m ²
01:14 undefined	17 °C	17 °C	97 %	NNW	3.0 km/h	6.0 km/h	1013.55 hPa	--	2.03 mm		w/m ²
01:19 undefined	17 °C	17 °C	97 %	South	4.0 km/h	6.0 km/h	1013.21 hPa	--	2.03 mm		w/m ²

Figura 7: Ejemplo de tabla de datos para descarga. Estación "IPUNILLA5". Día 12/11/2018.

Los datos de las estaciones *Oficiales* se encuentran disponibles para ser descargados rápidamente y organizados en intervalos seleccionados por el usuario. Esta es una gran facilidad ya que significa un ahorro de tiempo considerable y pueden analizarse instantáneamente.

Los análisis se realizan en intervalos de tiempo específicos para organizar los datos disponibles. Se toman ventanas más generales a partir del año 2017 donde se comenzó a disponer de más estaciones *No-oficiales*. Además, se analizan algunos eventos de precipitación extraordinarios que ocurrieron en los últimos años, como el evento del 8 de mayo de 2018 y el evento del 12 de noviembre de 2018.

Por último, se analizan eventos de precipitación puntuales del verano del 2019 donde se realizaron comparaciones puntuales de las diferentes fuentes de información.

2.3 Análisis de Datos Meteorológicos

Las variables descritas anteriormente fueron analizadas en la zona de estudio, donde se disponen los datos de las estaciones que se muestran en la figura siguiente.

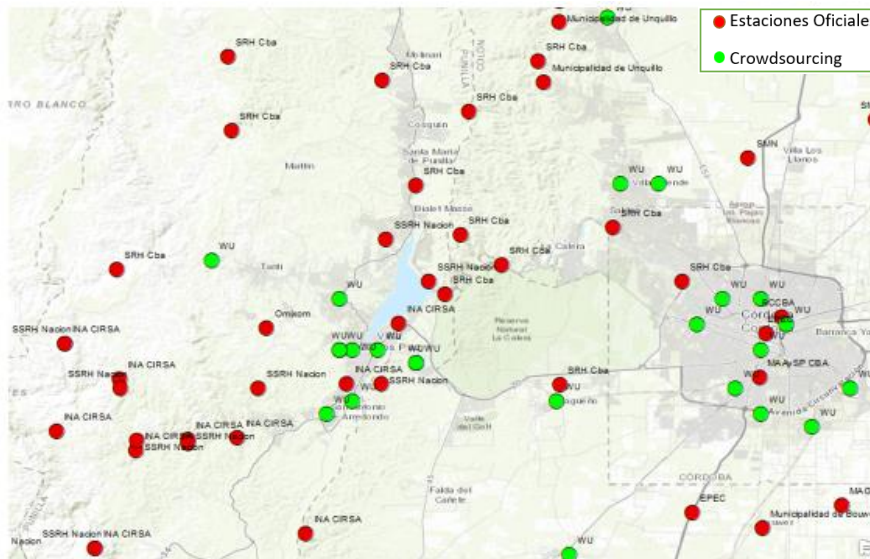


Figura 8: Estaciones meteorológicas ubicadas en el área de estudio. Diferenciando estaciones Oficiales y No-oficiales.

A partir de analizar la Figura 8 , se puede decir, que se cuenta con mayor cantidad de datos *Oficiales* pero los mismos se encuentran más dispersos. Del mismo modo, se puede observar claramente que la densificación de la red de monitoreo se produce en las zonas urbanas donde preponderan las estaciones de bajo costo, en este caso la ciudad de Córdoba y Villa Carlos Paz. Es importante tener en cuenta que a futuro se debería contar con una densidad superior a la actual, para así aumentar la precisión de las estimaciones.

Las estaciones utilizadas para realizar los análisis son 21 en total y se muestran en la Tabla 2, a continuación:

Tabla 2: Estaciones utilizadas para los análisis de las variables.

Plataforma	ID	Nombre estación
Weather Underground	IPUNILLA14	Estancia vieja
	IPUNILLA2	Los Manantiales
	ICRDOBAV16	José Muñoz
	IVILLACA18	Playas de Oro
	IPUNILLA11	San Antonio de Arredondo
	ICRDOBAP10	Tierra Alta
	IVILLACA11	Dante Alighieri
	IPUNILLA5	Altos del Durazno
SGA INA-CIRSA	100	Santo Tomas
	200	Puesto Pereyra
	600	Bo. El Canal
	700	Confluencia El Cajón
	1100	Villa Carlos Paz
	2900	Villa Caeiro
	3051	Rep Cerro Minero
	4100	Confluencia Saldan
	4200	Chateau
	4400	El Diquecito
MAGyA		Los Chorrillos
		Arroyo Los Quebrachitos
SMN		Córdoba Observatorio

Teniendo en cuenta la menor disponibilidad de estaciones *No-oficiales* y la irregularidad de las mismas, es necesario considerar también el número de datos que nos brindan en el tiempo. En la siguiente imagen (Figura 9), se observa la cantidad de datos de precipitación de cada fuente a partir del mes de agosto del año 2016. Es importante aclarar previamente, que se consideran los datos simultáneos con los que se cuentan, es decir que en algún caso puede diferir al número de estaciones presentadas anteriormente.

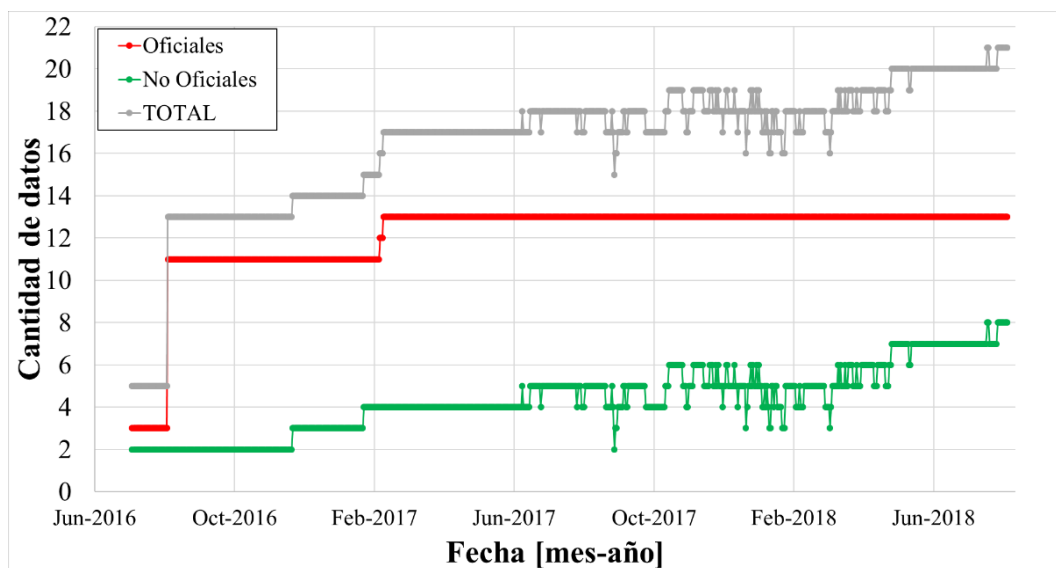


Figura 9: Cantidad de estaciones Oficiales y No-oficiales que registran datos de precipitación en la zona de estudio, a partir del mes de agosto del año 2016.

Puede verse que las estaciones *Oficiales* permanecen constantes en su valor, y, por otro lado, se observa cómo a partir del mes de junio del año 2017 comienzan a disponerse de nuevos datos *No-oficiales*. Además, se ve que los mismos tienen algunas discontinuidades en el envío de la información.

Este análisis resulta de especial importancia ya que, si se busca verificar las mejoras en el aumento de fuentes de información se debe contar con un número mínimo de datos disponibles para que el estudio tenga representatividad.

A continuación, se analizaron las temperaturas medias diarias registradas en el período de estudio. Teniendo en cuenta que al comienzo del mismo la cantidad de las estaciones que proveen datos no es demasiado significativa. Además de esto, hay que considerar que las estaciones pertenecientes a la red INA-CIRSA no brindan datos de dicha variable por lo que se dispone de un número menor de estaciones.

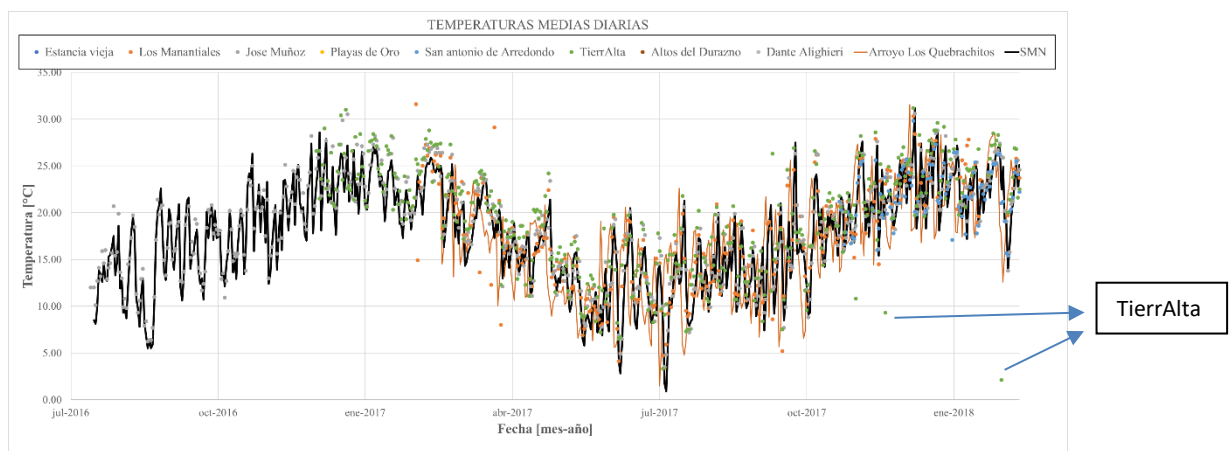


Figura 10: Temperatura media diaria registrada en el período 07/2016 - 07/2018.

En la Figura 10, se puede observar claramente variaciones significativas en algunas estaciones *No-oficiales*. Las mismas pueden variar entre los 10°C y 15°C por lo que deben ser tenidas en cuenta. Se distinguen claramente los errores en la medición en la estación “TierrAlta”, por lo que habría que verificar si la ubicación y las condiciones de mantenimiento son las adecuadas en esta estación de bajo costo.

Para observar esta variable con más precisión ya que el período anterior puede ser demasiado elevado, se tomó un período de un año a partir del mes de marzo del año 2017, utilizando como datos referenciales los obtenidos en la estación ubicada en el Aeropuerto de Córdoba del Servicio Meteorológico Nacional.

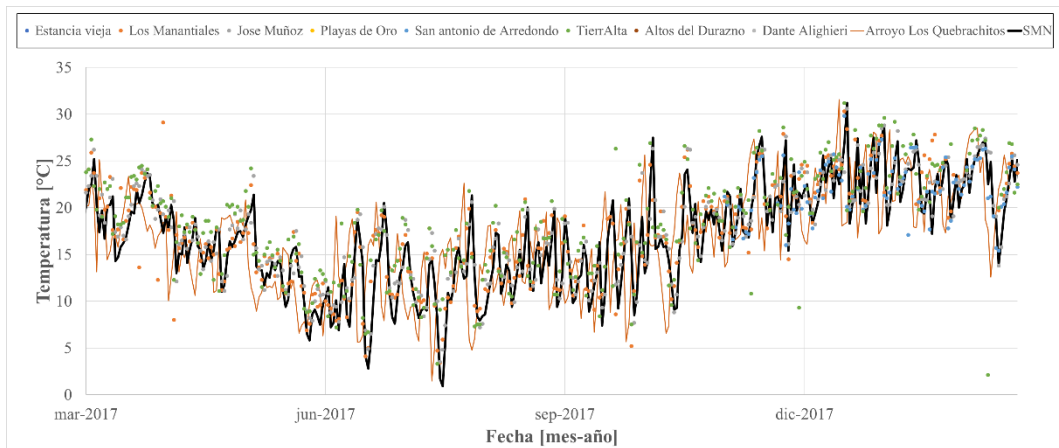


Figura 11: Temperatura media diaria registrada en el período anual 03/2017 - 03/2018.

A partir de la Figura 11, se confirmó lo mencionado anteriormente, las variaciones de temperatura son significativas pero las estaciones en general brindan datos que pueden ser tenidos en cuenta.

Se realizó también un esquema muy similar al anterior, pero acortando el período de análisis a un mes.

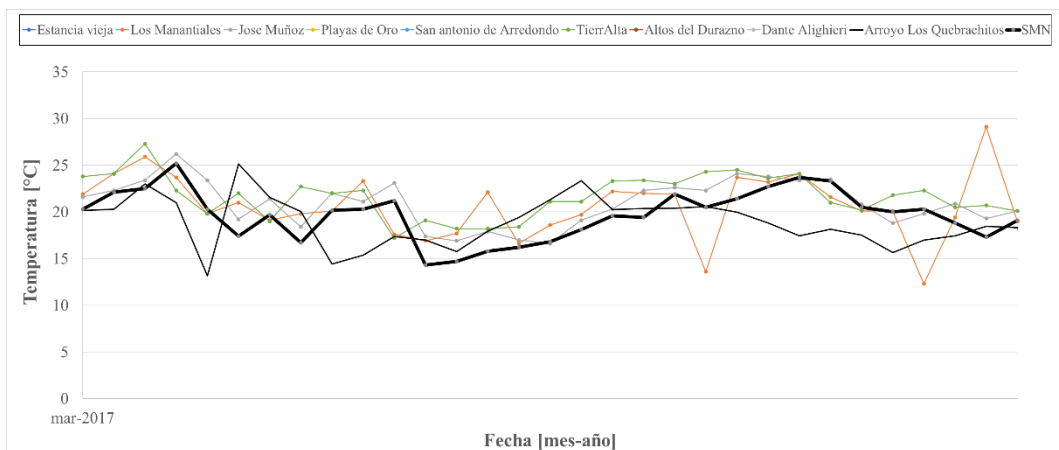


Figura 12: Temperatura media diaria registrada en el período mensual 03/2017.

En la Figura 12, se puede confirmar lo anterior, observando algunas variaciones en el tramo central donde los valores *Oficiales* son inferiores, esto puede deberse a las condiciones de instalación o además de esto a la ubicación de los equipos de medición ya que la estación de referencia se encuentra en el aeropuerto de la ciudad de Córdoba.

Una vez analizadas las mediciones de temperatura se realizaron gráficos en la misma ventana temporal, pero a partir de los datos de presión brindados por las mismas estaciones. Es importante mencionar previo a cualquier análisis que, al igual que lo ocurrido con la Temperatura, no se encuentran disponibles los datos de presión del CIRSA para ser descargados, por lo que disminuye el número de estaciones a analizar.

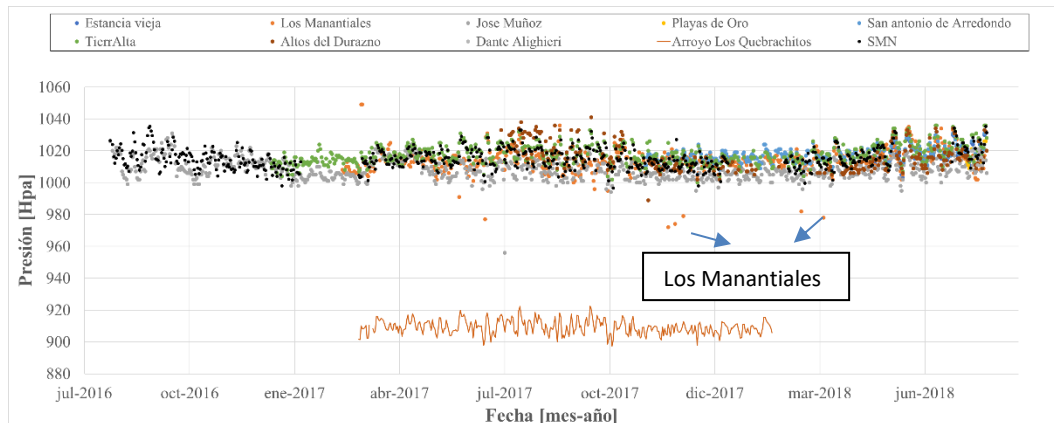


Figura 13: Presión media diaria registrada en el período 07/2016 - 07/2018.

Analizando la Figura 13, se distinguen algunas variaciones aisladas en la estación “Los Manantiales”. Hay que tener en cuenta que se muestran períodos bastante extensos, por lo que en cantidad no se trata de un número demasiado elevado. Además de esto se observa un sesgo que puede deberse por algún error de calibración en la correspondiente a “Arroyo los Quebrachitos”, éste último debe ser tenido en cuenta, pero seguramente puede corregirse con relativa facilidad ya que se trata de una diferencia constante de valores.

Para realizar un análisis similar al realizado con la temperatura se acortó el período de análisis adoptado, se tomó un período anual a partir del mes de marzo del año 2017.

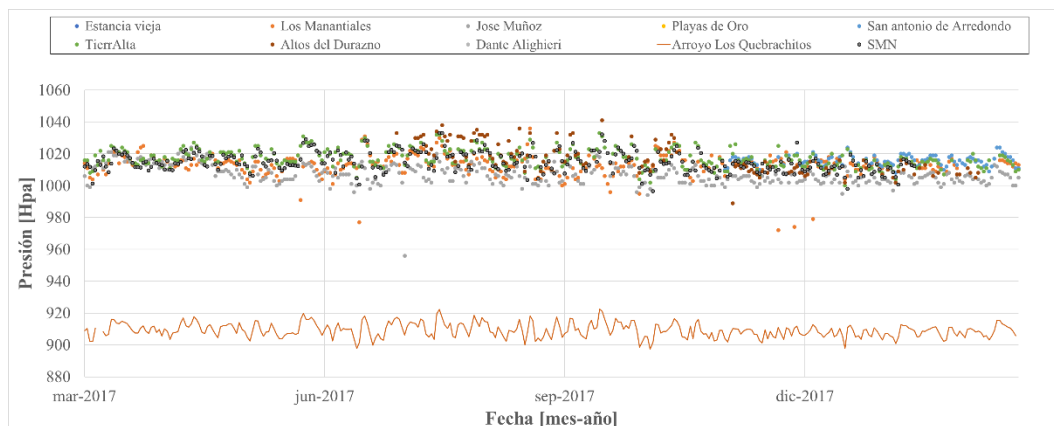


Figura 14: Presión media diaria registrada en el período anual 03/2017 - 03/2018.

En la Figura 14, se confirma la apreciación realizada anteriormente. Se puede observar que en general las mediciones son buenas, teniendo en cuenta la diferencia constante con la estación “Arroyo los Quebrachitos”, que se estima pueda deberse a un problema de configuración del equipo de medición. Se aprecia, además, que el número de datos erróneos que brinda la estación “Los Manantiales” no es considerable y se trata de mediciones aisladas que pueden deberse a condiciones externas.

Por otro lado, la estación “TierrAlta” se encuentra siempre en los valores límites superiores, tanto en el análisis de temperatura como en el de presiones, por lo que se empodera la hipótesis de verificar las condiciones de instalación de la estación.

Como en los gráficos anteriores no es posible realizar grandes análisis, ya que son valores muy cambiantes diariamente, solo se puede decir que, se observa una correlación de los datos obtenidos y se identifica una de las estaciones con un sesgo importante. Esto se debe a que en general los valores son cercanos a los 1000hpa, pero una de las estaciones difiere sustancialmente con valores menores.

Para una mejor observación se decidió acortar el período a el mes de marzo, resaltando además la estación instalada por el Servicio Meteorológico Nacional, y se obtuvo en este caso el siguiente gráfico.

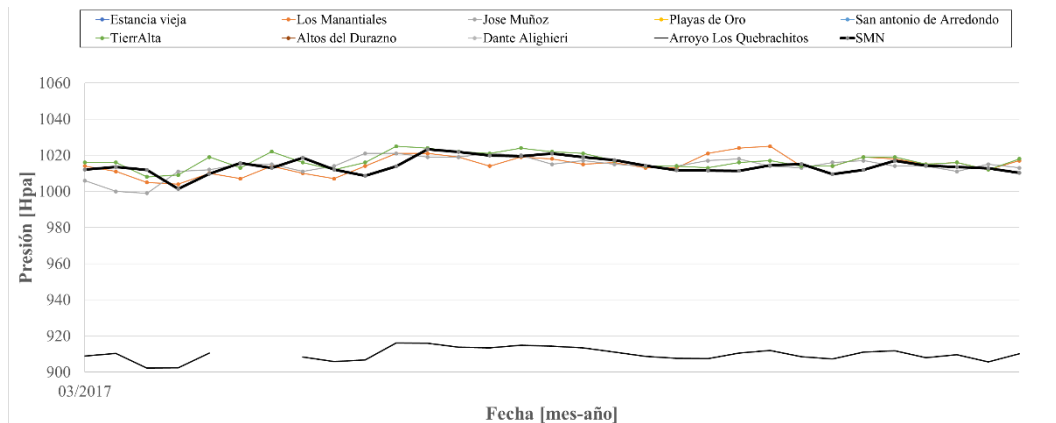


Figura 15: Presión media diaria registrada en el período mensual 03/2017.

La Figura 15, permite observar más claramente lo mencionado anteriormente, confirmando lo planteado en el gráfico general. La diferencia existente es cercana a los 100hpa y puede deberse a problemas de calibración de la estación.

Continuando con el análisis de las variables meteorológicas, uno de los aspectos que más interés despiertan a los fines hidrológicos, son las precipitaciones observadas por los diferentes instrumentos.

Se continuó con la misma base de análisis, graficando las precipitaciones medias diarias observadas en cada estación para el período definido, en este caso aplicado para la zona de la ciudad de Villa Carlos Paz.

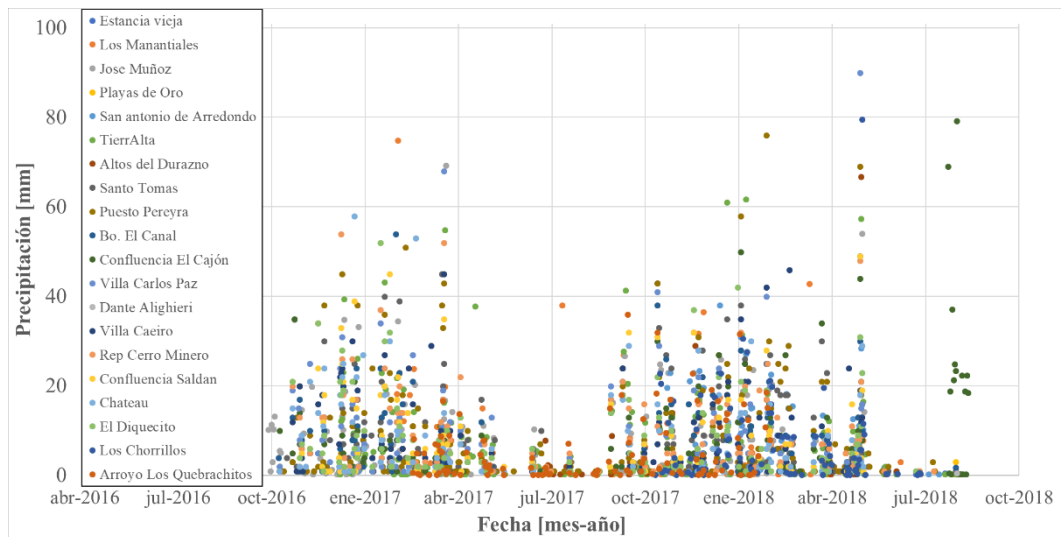


Figura 16: Precipitación media diaria registrada en el período 06/2016 - 06/2018.

La Figura 16, permite identificar algunas estaciones que han registrado valores elevados cuando otras no han registrado precipitaciones en Julio del 2017. Del mismo modo, en el año 2018 numerosas estaciones muestran elevados valores de precipitaciones mientras que otras permanecen en cero. Lo más llamativo de esto es que estos valores elevados se presentan en meses de estiaje donde las lluvias suelen ser próximas a cero.

Por último, cabe resaltar que las diferencias entre estaciones próximas son posiblemente debido a que, en general, los datos de lluvia presentan patrones espaciales y temporales, situación atípica para las variables presentadas anteriormente.

Para estudiar mejor los procesos de lluvia, se realizaron gráficos de precipitación acumulada en cada una de las estaciones.

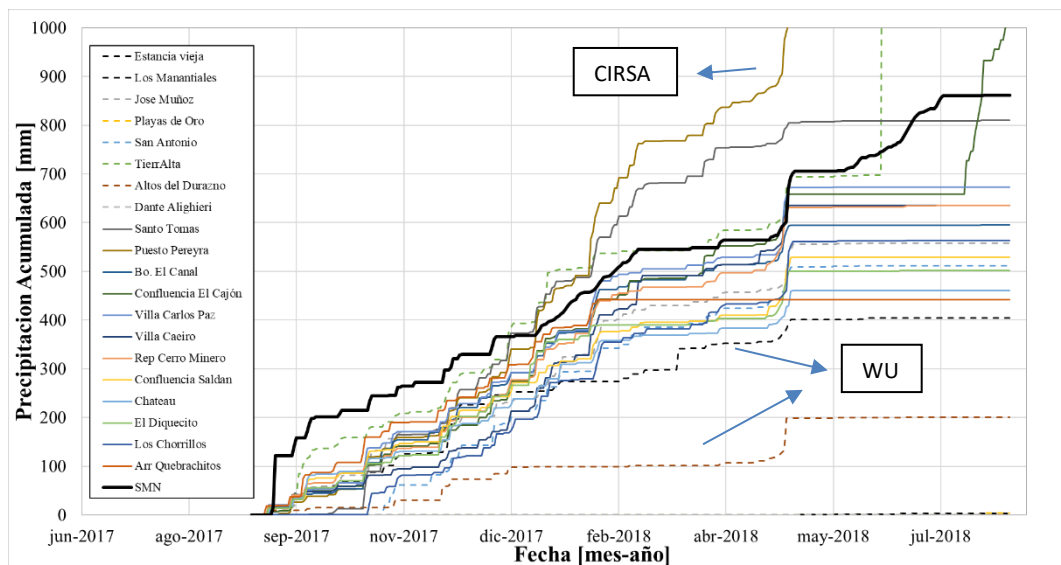


Figura 17: Precipitación acumulada registrada en el período anual 09/2017 - 09/2018.

En la Figura 17, se puede observar las estaciones que presentan variaciones constantes con respecto al resto. Esto hace que a lo largo de un cierto período se distancien

considerablemente de los otros valores y se pueden identificar fácilmente, este es el caso de las estaciones de Puesto Pereyra y Santo Tomás del CIRSA y la estación de Altos del Durazno.

Teniendo en cuenta que dos de ellas pertenecen a estaciones *Oficiales*, puede indicar que en muchos casos las estaciones *No-oficiales*, no miden con demasiada precisión las precipitaciones caídas en una determinada región. Es por esto que, en períodos más extensos, estas mínimas diferencias producen diferencias más amplias.

A pesar de lo mencionado anteriormente, en relación al origen de los datos, es diferente el análisis que se debe que realizar cuando se trata de una estación perteneciente a la plataforma online Weather Underground. En este caso, las diferencias pueden deberse a problemas de instalación de las estaciones o interferencias permanentes que tengan las mismas que inhabilitan las mismas por un cierto período, que en el caso de las estaciones con supervisión permanente deberían ser las adecuadas.

Acordando el período de análisis a únicamente el mes de mayo, en donde se registró un evento importante el octavo día del mes, se permiten identificar los días de mayores precipitaciones y como varían las mediciones en cortos tiempos de lluvias intensas.

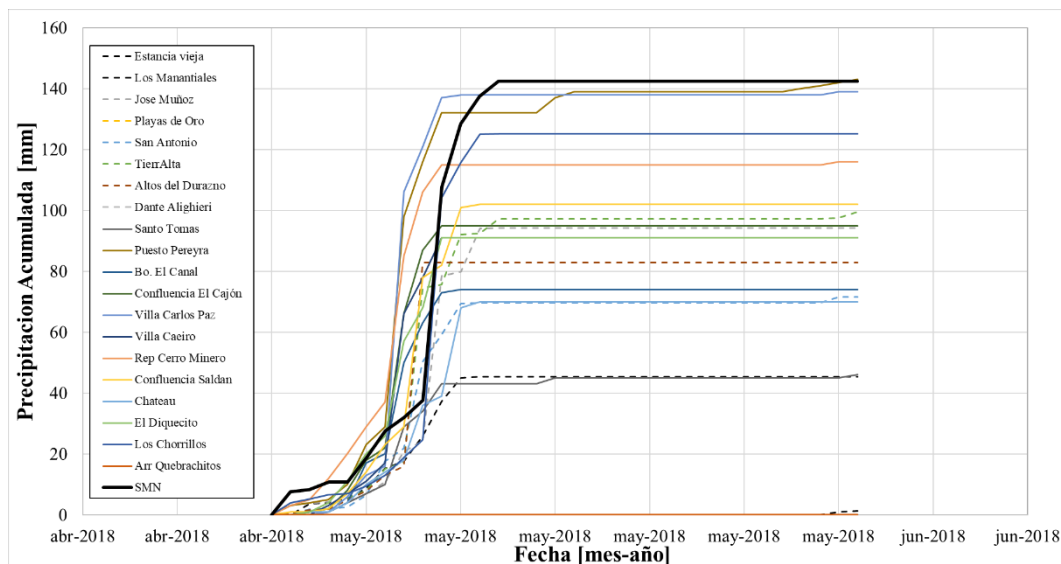


Figura 18: Precipitación acumulada registrada en el período mensual 05/2018.

En general las precipitaciones se registraron entre el día 5 y el día 10 de mayo, por lo que se analiza con más precisión el día 8, sabiendo que los valores fueron considerables en la zona.

Se graficaron las precipitaciones registradas el día 8 de mayo del año 2018, pudiendo obtener información únicamente de cuatro estaciones de bajo costo, esto es debido a las intermitencias que presentan y como en este caso, pueden tener baches en la información que es relevante para el análisis.

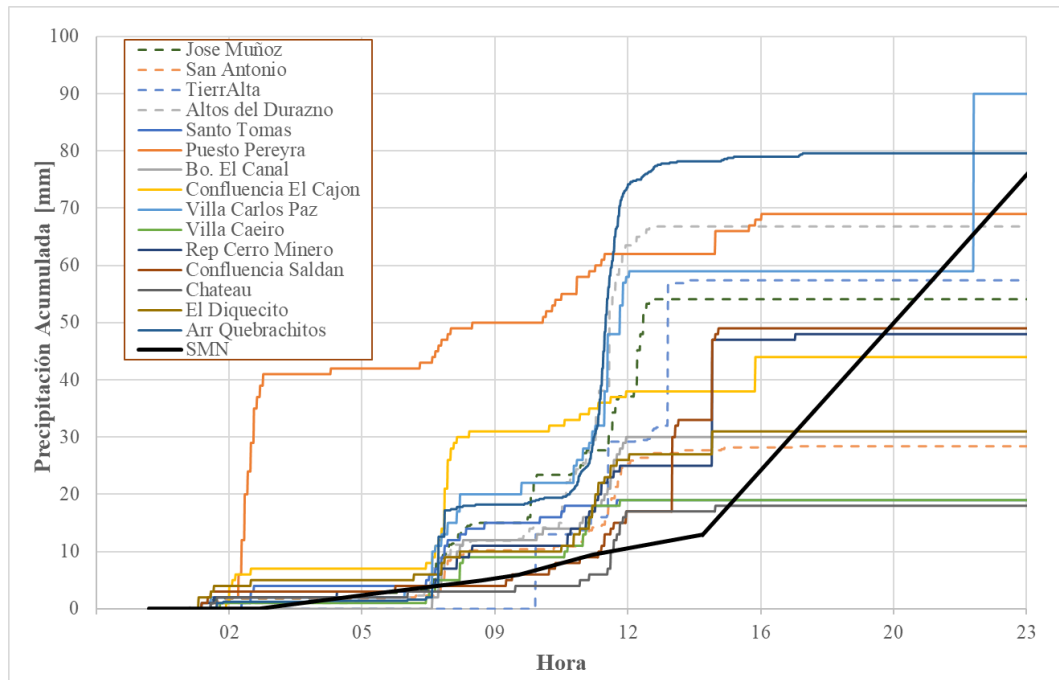


Figura 19: Precipitación acumulada registrada en el día 08/05/2018.

Se puede observar en la Figura 19, que, en general, los valores tienen correlación, y las precipitaciones fueron observadas entre las 8 hs y las 15 hs del día 8 de mayo. A pesar de esto hay algunos saltos que deben ser identificados en las estaciones *No-oficiales* antes de realizar cualquier análisis.

Por otro lado, se observa un claro desfase en los datos registrados por la estación perteneciente al SMN. Esto puede deberse al método que cada fuente aplica para la carga de los datos. En el caso de las fuentes *No-oficiales*, es automático e instantáneo, mientras que, el SMN registra el dato de lluvia cuando se observa el mismo y no cuando se dio la lluvia, es decir, el día anterior.

Por último, se analizó la posible correlación existente entre las variables precipitación y viento, en algunos eventos seleccionados y se realizó el siguiente gráfico.

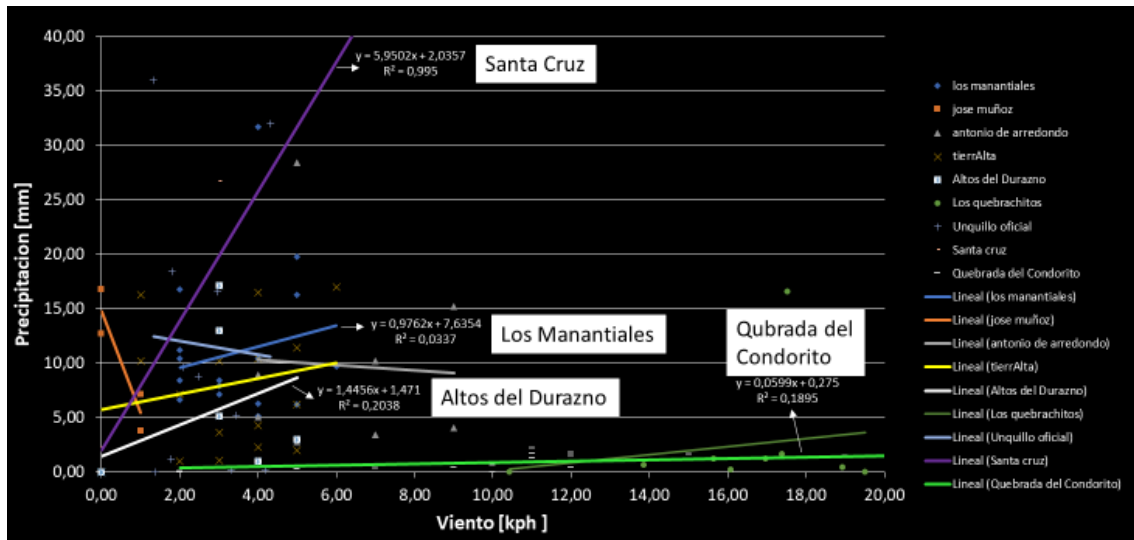


Figura 20: Análisis de correlación entre la precipitación y el viento.

La Figura 20, nos permite identificar solo algunas coincidencias en estos fenómenos, pero no son demasiado significativas. Esto se debe a que los valores más significativos, como por ejemplo la estación “Santa Cruz”, no presentan demasiadas coincidencias en términos cuantitativos por lo que no es representativo.

2.3.1 Comparación de fuentes de datos

Se realizó el siguiente análisis ya que se considera de especial importancia la determinación de los errores existentes en los valores obtenidos en las estaciones de bajo costo. Se tiene en cuenta que las condiciones de localización y mantenimiento realizado son esenciales para la correcta lectura de valores en las mismas.

A partir de lo anterior se intenta comprobar que los datos son utilizables y pueden ser muy importantes para la estimación de valores donde no existen datos en la actualidad, a un costo sustancialmente menor al de una estación meteorológica convencional.

Para la comparación planteada anteriormente se utilizaron valores obtenidos a partir de observaciones en diferentes ventanas temporales, comenzando en un período anual a partir del mes de marzo de 2017, y algunos eventos a comienzos del 2019. Los mismos son días aleatorios en donde se registraron precipitaciones de diferentes intensidades en general durante la noche.

Además de esto se compararon específicamente las diferentes variables con los valores obtenidos de instituciones *Oficiales* y datos descargados de *Weather Underground*.

Teniendo en cuenta que se hace el análisis para considerar el aspecto económico, es importante diferenciar las estaciones que se utilizan, por ejemplo, las provistas por *MeteoStar*.

Continuando con la modalidad anterior, se analizan las lecturas de precipitaciones registradas durante el verano del año 2019 por cuatro pluviómetros localizados muy próximas entre sí en la ciudad de Carlos Paz. La particularidad de este análisis es que uno de los pluviómetros analizados cumple los requerimientos de la OMM (Organización Meteorológica Mundial), por lo tanto, se decidió tomarlo como valor de referencia. Del

mismo modo, se incluyó un pluviómetro de alta frecuencia (PAF) y un pluviómetro totalizador (PT) de la red MATTEO, un PAF de la red INA-CIRSA y el PAF homologado. La comparación se presenta en el siguiente gráfico.

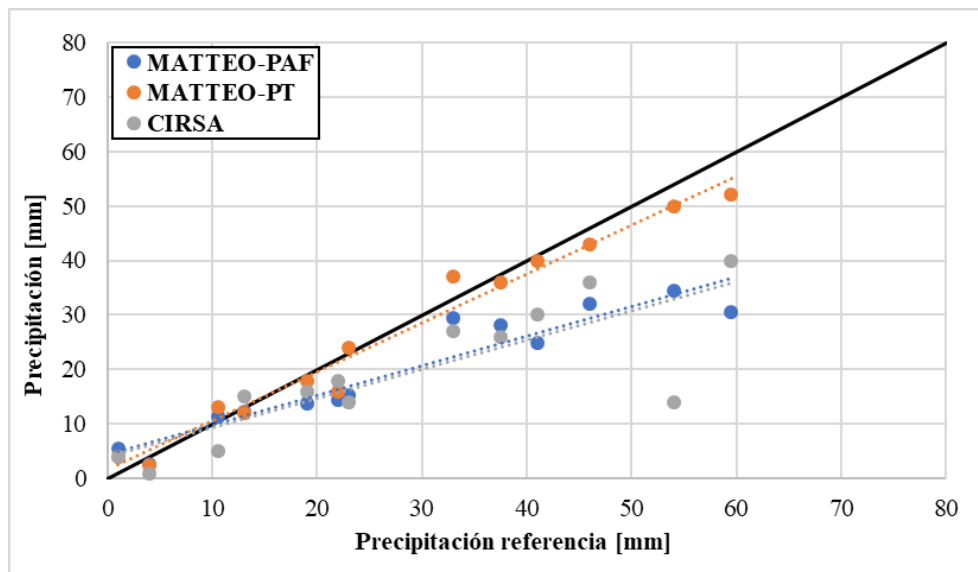


Figura 21: Comparación de datos de precipitaciones aisladas.

A partir de la Figura 21, se observa que el MATTEO-PT presenta valores muy similares al homologado por OMM (línea de 45°), a pesar de algunas variaciones mínimas cuando los valores de precipitación crecen.

Por otro lado, analizando las líneas de tendencia, se determinó que los datos obtenidos por las fuentes restantes presentan valores inferiores con variaciones proporcionales al valor de la precipitación, es decir que mientras mayor sea la precipitación registrada, mayores errores existen en los registros.

Para analizar específicamente el error en los registros de las diferentes estaciones se realizó el siguiente gráfico con las líneas de tendencia correspondientes a cada serie.

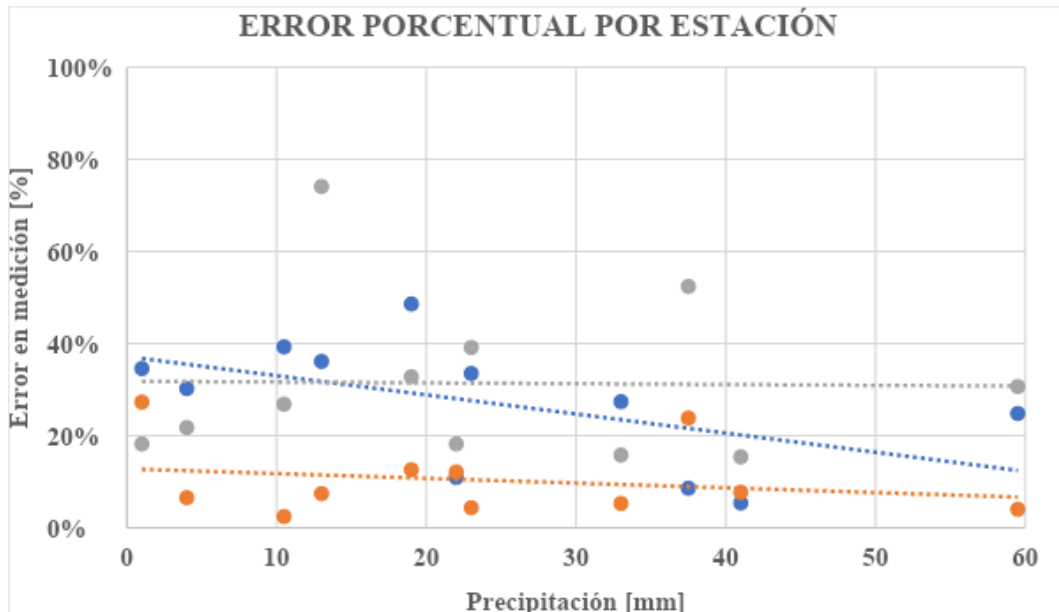


Figura 22: Error porcentual en los registros de precipitaciones aisladas.

Se puede observar que porcentualmente, los errores no tienden a aumentar con la precipitación registrada. A pesar de esto el valor absoluto de los mismos es superior, para comprobar esto se muestra el gráfico siguiente.

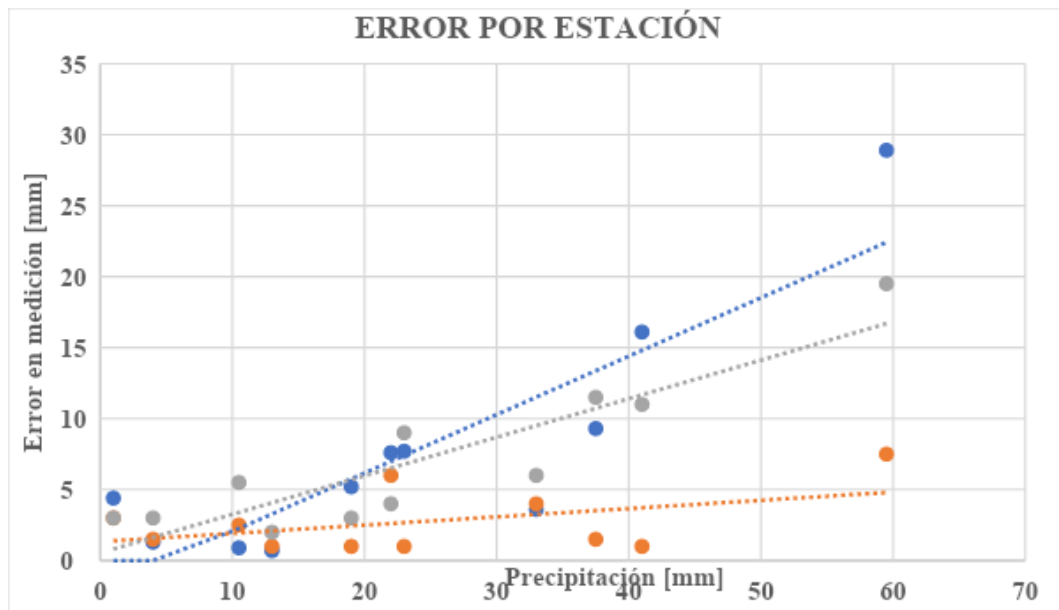


Figura 23: Error absoluto en los registros de precipitaciones aisladas.

A partir de la Figura 23, podemos decir que a medida que las precipitaciones son mayores, el error tiene mayor importancia ya que puede alcanzar los treinta milímetros de diferencia, que a niveles altos tienen gran incidencia.

Una de las posibles aplicaciones de lo explicado anteriormente es la utilización combinada de la información. Esto es posible ya que los pluviómetros totalizadores brindan buena información de la precipitación registrada pero no definen la distribución

temporal de la misma. La técnica consiste en utilizar la distribución de los equipos de alta frecuencia, pero con los valores totales de los pluviómetros totalizadores.

2.4 Síntesis

En general, a partir de los diferentes análisis realizados anteriormente se puede concluir en que los datos provenientes de las plataformas online pueden ser utilizados, pero antes se deben comparar los mismos para identificar los errores grandes que pueden presentarse en los diferentes valores. Es por esto que se debe contar con un número mínimo de estaciones y ser analizados por separado previamente.

En el análisis de temperaturas medias diarias se identificó a la estación “TirrAlta” con algunos datos aislados, con valores inferiores al resto. Por otro lado, en lo que se refiere a las presiones medias diarias se identificó a la estación “Los Manantiales” con datos erróneos y un error de calibración en la estación “Arroyo los Quebrachitos”, perteneciente al CIRSA. Es por esto que se deberían verificar las condiciones de instalación de las mismas.

En el caso del análisis de precipitaciones acumuladas, no se logró identificar alguna estación en particular errónea, sino, que al contrario se observó que en los valores extremos se encuentran tanto estaciones *Oficiales* como *No-oficiales*. Las estaciones *No-oficiales* se encuentran en los rangos inferiores ya que pueden inhabilitarse periódicamente por diferentes causas como cortes energéticos o interferencias no detectadas ya que no cuentan con supervisión permanente.

Por otro lado, al final del capítulo se comprobó que los valores de precipitaciones obtenidos por los pluviómetros más económicos son confiables, si se encuentran colocados adecuadamente y operados por personal idóneo. Sería importante realizar un análisis comparativo en más puntos de interés, para asegurar que el resultado es el correcto en la red de equipos disponible.

Además, sería importante mejorar el sistema de descarga de los datos, ya que los intervalos de tiempo diferentes o aleatorios, hace que la tarea de organización de los mismos para realizar cualquier análisis sea algo dificultosa requiriendo algo de tiempo y esfuerzo extra antes de cada actividad.

3 RIESGO DE INCENDIO

3.1 Introducción

En la provincia de Córdoba, los incendios son una problemática actual que debe combatirse todos los años y es importante contar con los instrumentos necesarios para prever y evitar los mismos, a través de la creación de diferentes programas y normativas. A continuación, se muestran algunos recortes que evidencian lo anterior, dando una idea de la gravedad de la situación actual.

Incendios En Córdoba



3.09.2018 por
CORRESPONSALÍA

INCENDIOS EN CÓRDOBA

Contienen un vasto incendio que consumió 800 hectáreas en Traslasierra

Fue en una zona cercana de Salsacate. Empezó este domingo y recién pudo ser controlado, aunque aún no extinguido, este lunes.



29.08.2018

FUEGO EN CÓRDOBA

Incendios: hoy es el día de más riesgo del año

Lo afirman con base en las condiciones meteorológicas. Ayer hubo una docena de focos activos.



28.08.2018

EDITORIAL OPINIÓN

El factor climático y la desidia humana

Es impostergable ajustar los controles, sancionar a los infractores y extender las alertas desde las órbitas oficiales. Imputan al intendente de Capilla del Monte



Figura 24: Artículos periodísticos extraídos del sitio La Voz del Interior.

El inicio de un incendio está condicionado a la presencia de una fuente de ignición, ya sea ésta, natural o antrópica. Dada la fuente de ignición, diversos factores ambientales condicionan la ocurrencia de un foco. Las características de la vegetación y el estado del tiempo, como así también la topografía, serán factores determinantes del posterior comportamiento del fuego. Asimismo, la evolución del incendio estará condicionada por las acciones que se tomen para su supresión; las características del terreno donde se

desarrolle el fuego, las vías de acceso y la cercanía a fuentes de agua, serán todos factores que contribuirán al grado de dificultad que presentarán estas acciones.

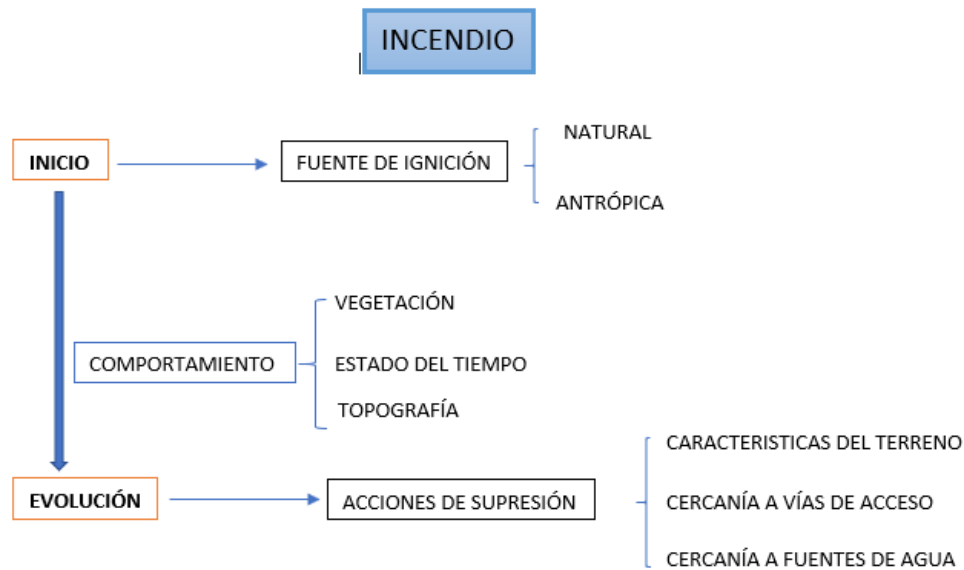


Figura 25: Esquema evolutivo de un Incendio.

La ocurrencia de los incendios forestales en una región es afectada por las condiciones de las capas más bajas de la atmósfera en un determinado tiempo y por las alteraciones climáticas ocurridas con el paso del tiempo. Esos cambios ocurren debido a la naturaleza de la atmósfera y de las reacciones al recibimiento de la energía emitida por el sol. Por este motivo, el conocimiento de las variables meteorológicas es de gran importancia en la prevención de los incendios.

A través de las variables meteorológicas se pueden identificar los días y épocas de mayores probabilidades de ocurrencia de incendios y con esas informaciones, se pueden tomar medidas técnicas y administrativas para reducir el potencial de daños por el fuego.

El objetivo del análisis es la determinación de los riesgos de incendio en la zona de estudio, a través de los diferentes métodos. Además, comparar y aplicar los diferentes resultados para determinar cuál es el índice o método más adecuado. Por otro lado, aplicar los datos obtenidos de las estaciones de bajo costo vinculadas directamente con la plataforma online Weather Underground. Esto permite obtener una información más detallada, aumentando la precisión en los diferentes análisis realizados, así como también, una mayor discretización de la zona de interés.

Los diferentes eventos que pueden producirse, pueden traer consecuencias importantes en las poblaciones y urbanizaciones potencialmente afectadas. Es por esto que es muy importante el monitoreo y medición precisa de eventos extremos y aspectos que pueden ser desencadenantes de los mismos. Es por esto que se hace hincapié en el índice de incendios, para tomar las medidas preventivas adecuadas y evitar esta problemática muy importante en la zona.

3.2 Metodología

Diversos sistemas se han desarrollado con el objetivo de evaluar los factores condicionantes de la ocurrencia, el comportamiento y los efectos de los incendios. Aquellos sistemas que evalúan la probabilidad de que exista una fuente de ignición, se denominan sistemas de evaluación de riesgo de incendio. Aquellos sistemas que, además del riesgo, toman en cuenta la probabilidad de ignición, las características del comportamiento del fuego en caso que un foco prospere, las dificultades para el control y los daños que causaría, se denominan sistemas de evaluación de peligro de incendio.

Los sistemas de evaluación de riesgo y/o peligro de incendio se componen de índices, cada uno de los cuales es un indicador de la contribución de un determinado factor a la probable ocurrencia, el comportamiento y los efectos de un incendio. Los más simples se componen de un único índice, que generalmente toma en cuenta solo el efecto de la temperatura, la humedad relativa y la precipitación para proveer información sobre la probabilidad de ignición, dada la existencia de una fuente de ignición. Sistemas más complejos incorporan relaciones entre las variables del tiempo, el estado de los combustibles y el comportamiento del fuego, para producir indicadores que provean una medida cuantitativa de las dificultades de control, en términos de características del frente de llamas, y del daño o impacto potencial que causaría el incendio.

Existen también otros tipos de índices que enfatizan sobre el comportamiento de una única variable y que se utilizan para complementar a los sistemas de evaluación de peligro de incendios. Así encontramos índices de sequía que evalúan la disponibilidad de agua o estado de humedad de los combustibles; o índices de estabilidad que permiten conocer las condiciones de estabilidad de la atmósfera.

En el caso de las estaciones *Oficiales*, en particular las estaciones del Instituto Nacional del Agua, brindan únicamente datos de las precipitaciones registradas. Es por esto que no pueden ser utilizadas para determinar los índices de incendios y realizar algunos análisis referidos a esto. Además, para la determinación de los diferentes índices, son necesarias algunas variables que no son brindadas por la mayoría de las estaciones de bajo costo, como puede ser la temperatura del punto de rocío o el déficit de saturación del aire. Es por esto que se decidió incorporar algunas identificadas en el área cercana a la zona de estudio para tener un mínimo de valores y tenga cierta representatividad, como se muestra en la Figura 26.



Figura 26: Ubicación de estaciones utilizadas para la determinación de los Índices de Incendio.

3.2.1 Influencia de las variables hidro-meteorológicas en los incendios

3.2.1.1 Radiación Solar

En este aspecto, la situación más crítica, es cuando no existen nubes ya que la radiación alcanza directamente la superficie terrestre. Una parte de la radiación que incide en la superficie es absorbida, produciendo así un calentamiento de la misma, y otra parte es reflejada. Además, hay una porción absorbida por diferentes elementos como el vapor de agua, ozono y dióxido de carbono. Otro factor a tener en cuenta, es la ubicación geográfica y la topografía del terreno analizado.

La radiación solar es la variable meteorológica más importante, influyendo en todas las demás ya que es la responsable de todas las variaciones del tiempo y clima en la superficie terrestre.

3.2.1.2 Temperatura

La temperatura de los diferentes elementos afecta tanto a la probabilidad de ocurrencia como al potencial de propagación de los incendios forestales. La temperatura del aire varía fundamentalmente de acuerdo a la temperatura de la superficie terrestre.

Los efectos de esta variable son tanto directos como indirectos. Estos últimos son más importantes ya que, por ejemplo, incide directamente en el contenido de humedad de

los diferentes elementos combustibles siendo este un factor fundamental para el desarrollo de un incendio.

3.2.1.3 Presión Atmosférica

Existen diferentes sistemas de acuerdo a la circulación de aire, puede ser anticiclónica asociada a alta presión, o ciclónica asociada a baja presión y temperaturas más altas.

El viento es una variable importante en la propagación de un incendio y la velocidad del mismo es proporcional al gradiente que se genera entre los diferentes puntos. Siempre soplando hacia el centro de baja presión puede tener diferentes velocidades.

3.2.1.4 Humedad Atmosférica

La humedad atmosférica es el elemento más importante en la potencialidad de un incendio ya que incide directamente en la inflamabilidad de los combustibles forestales. Además, tiene otros efectos indirectos sobre algunos aspectos de comportamiento del fuego.

Existen diferentes maneras de expresar la cantidad de vapor de agua presente en una cierta muestra de aire, ya que se encuentra mezclada con otros gases.

3.2.1.5 Viento

Los vientos de origen local o vientos convectivos, causados por diferencias locales de temperatura, pueden ser tan importantes en la propagación de los incendios como los vientos producidos por la diferencia de presión en escala sinóptica, o macroescala. En muchas áreas los vientos locales predominan, sobreponiéndose a la circulación general de la atmósfera.

Los vientos locales que más afectan la propagación de los incendios, los que deben ser cuidadosamente analizados en las operaciones de combate a los incendios, son las brisas de mar y de tierra y los vientos de montañas y de valles. El viento puede afectar el comportamiento del fuego en el bosque de diversas formas: acelera el secado de los combustibles, pues transporta el aire cargado de humedad, puede “avivar” ciertos materiales en brazas y estos dar origen al fuego Suministra oxígeno a la combustión Inclina las llamas hacia los combustibles que aún no se han quemado, puede producir focos secundarios por saltos del fuego principal y determina la dirección de propagación del fuego.

3.2.1.6 Precipitación

La precipitación es uno de los aspectos de mayor incidencia en los incendios. En general la ocurrencia de grandes incendios se encuentra asociada a períodos prolongados de seca. Cuando ocurre una precipitación la probabilidad de ocurrencia de un incendio

puede llegar a ser nula. A pesar de esto hay que tener en cuenta que los elementos combustibles pueden secar rápidamente volviéndose nuevamente propensos a incendiarse.

Las precipitaciones presentan diferentes variaciones temporales, por lo que debe tenerse en cuenta siempre la época del año en la que se encuentra. Además, la precipitación diaria es uno de los componentes de varios índices de peligro de incendios, principalmente los acumulativos y por lo tanto, su medición es necesaria para establecer sistemas eficientes y económicamente viables de prevención de incendios forestales.

3.2.1.7 Estabilidad atmosférica

La estabilidad atmosférica se define como la resistencia de la atmósfera a que el aire se mueva verticalmente. Por otro lado, en la inestabilidad atmosférica se favorece el movimiento vertical del mismo.

Esta variable está relacionada con los movimientos verticales de la atmósfera. El calor del fuego, por sí solo, puede generar movimiento vertical, por lo menos próximo a la superficie, pero ese movimiento convectivo es afectado directamente por la estabilidad del aire.

El aire disminuye su temperatura con la altitud, a una tasa que depende principalmente de su contenido de humedad. Cuando el decrecimiento es grande con la altitud indica condiciones atmosféricas inestables, provocando así corrientes ascendentes y descendentes. Por otro lado, cuando existe inversión térmica que provoca un aumento de la temperatura con la altitud, resulta una atmósfera extremadamente estable.

La inestabilidad atmosférica, indica tiempo atmosférico que favorecerá el desarrollo del incendio, como temperaturas elevadas, menor humedad relativa, existencia de rachas de aire y vientos ascendentes de un comportamiento errático, por la posible presencia de remolinos y la mayor facilidad con que se pueden producir pavesas volantes. En contraposición, la estabilidad atmosférica no favorece el desarrollo del incendio, pues con ella se presentan menores temperaturas y mayor humedad relativa y vientos lentos o constantes.

3.2.2 Épocas de ocurrencia de incendios

Cada año los incendios forestales se presentan con mayor frecuencia en determinados meses del año. Este periodo es conocido como época de incendios, época de ocurrencias ó época crítica. Las épocas de mayores ocurrencias de incendios durante el año pueden variar bastante entre las regiones, especialmente en países de grandes dimensiones territoriales. Esas variaciones son causadas principalmente por el clima, aunque pueden ser influenciadas por los tipos de vegetación.

En general, la estación normal de incendios corresponde a la época del año en que la baja precipitación y la humedad relativa, favorecen la aparición de gran número de incendios forestales. Es así que, definir en cada territorio la época de incendios es de gran importancia para la planificación del manejo del fuego en los mismos. Para lograr

esto, tradicionalmente se utilizan las estadísticas de los incendios durante un periodo de años.

3.2.3 Índices de peligro de incendio

La estructura de los índices de peligro de incendio está fundamentalmente basada en las variaciones de ciertos factores meteorológicos. Pensándose en términos de una determinada área forestal, se pueden distinguir dos tipos de factores determinantes del grado de peligro de incendio: los de carácter permanente (material combustible, tipo de bosque y topografía) y los variables (condiciones climáticas). Los factores de carácter permanente no son apropiados para la determinación del grado de peligro de ocurrencia de incendios pues, a corto plazo, no varían. Siempre hay, por ejemplo, posibilidades de que se produzca un incendio en un bosque considerándose apenas los factores de carácter permanente. Ellos son útiles en índices más complejos, que estiman la velocidad de propagación y el potencial de daños de los incendios. Los factores variables a su vez, presentan una base sólida para la determinación del grado de peligro de ocurrencia.

Los índices de peligro de incendio pueden, empíricamente, ser divididos en dos grupos, índices de ocurrencia e índices de propagación. Los primeros estiman especialmente las probabilidades de ocurrencia de un incendio, esto es, si existen condiciones favorables o no para el inicio de la combustión. Los del segundo grupo, a través de la incorporación de la velocidad del viento y algunos factores de carácter permanente, además de las condiciones de combustión, ofrecen también una previsión del comportamiento del fuego, esto es, de las condiciones de propagación del mismo. Actualmente los índices más utilizados pertenecen al primer grupo.

Los sistemas de evaluación de peligro son herramientas imprescindibles para la planificación de actividades de prevención de incendios. Los mismos son indicadores útiles de las áreas donde es necesario efectuar reducción de combustibles y del momento más adecuado para realizarlas, de cómo decidir la asignación de recursos antes y durante el desarrollo de las temporadas de incendios y de cómo evaluar con mayor objetividad la eficiencia de las medidas de prevención y de las técnicas de supresión aplicadas.

El conocimiento de los índices de peligro de incendio es fundamental dentro de un plan de prevención y combate a los incendios forestales, por permitir la previsión de las condiciones de peligro, posibilitando de esa manera la adopción de medidas preventivas con bases más eficientes y económicas. Dentro de las diversas utilidades y aplicaciones de los índices de peligro de incendio se pueden destacar: conocimiento del grado de peligro, planificación del control de incendios, permisos para quemas controladas, establecimiento de zonas de peligro, previsión del comportamiento del fuego, y advertencia pública del grado de peligro.

Los índices son utilizados para: conocimiento y divulgación del peligro, regulación del uso de los bosques y ejecución de las operaciones que impliquen el uso del fuego, intensificación de las medidas preventivas, alerta de los medios de supresión, evaluación de los efectos de las medidas preventivas y de supresión y programación de los planes de defensa.

Por lo dicho anteriormente, se deduce que la utilización de un sistema de evaluación de peligro de incendios ya existente reduce significativamente las inversiones de tiempo y de dinero a los organismos de manejo del fuego; es por ello común la adopción total o parcial, de sistemas existentes.

Si bien la adopción de un determinado sistema puede permitir la reducción de costos de investigación y desarrollo, los costos de aplicar un sistema de evaluación de peligro que no se ajuste al ecosistema al cual se lo aplica, pueden ser mayores por inducir a decisiones de manejo inadecuadas. Por este motivo, la adopción de cualquiera de estos sistemas requiere de experiencias de prueba que permitan efectuar los ajustes adecuados para cada región.

En algunas regiones de nuestro país se utilizan diversos índices de peligro; sin embargo, no se ha definido aún un criterio nacional sobre la metodología a seguir para la evaluación de peligro. La Organización Meteorológica Mundial (OMM), aconseja la adopción de un único sistema a nivel nacional, que permita la comparación de las condiciones de peligro entre distintas regiones y asegure la adecuada asignación de recursos de prevención, supresión e investigación.

Dado que la decisión de optar por el desarrollo de un nuevo sistema o la adopción de alguno de los que se encuentran en uso, debe estar fundamentada en el conocimiento de los sistemas existentes, presentamos en este trabajo la descripción de algunos de los sistemas utilizados en distintos países.

Asimismo, describimos los criterios con los que fueron desarrollados y sus alcances y limitaciones.

3.2.3.1 *Sistemas compuestos por un único índice*

- *Índice de Nesterov*

El índice de ignición de Nesterov es el más frecuentemente utilizado de los diversos índices desarrollados en la antigua Unión Soviética. El mismo, es utilizado como un índice de ignición en el área de cobertura de una determinada estación meteorológica.

En su forma original, su ecuación básica es:

$$N = \sum (d . t)$$

Donde:

N: índice de Nesterov

d: déficit de saturación del aire (mb)

t: temperatura del aire (°C)

En general los cálculos se inician en la primavera, el primer día que la temperatura supera los 0°C y después que la nieve se ha derretido. Una precipitación mayor o igual a 3 mm reduce el valor del índice a cero y la sumatoria comienza nuevamente.

Las clases de peligro se determinan de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 3: Escalas de peligro para el Índice de Nesterov.

Clase de Peligro	Valor del índice
Nulo	≤ 300
Bajo	301 – 500
Moderado	501 – 1000
Alto	1000 – 4000
Extremo	≥ 4000

El límite superior para la clase de peligro “nulo”, se estableció para aquel valor del índice por debajo del cual no habían ocurrido incendios en 10 años. La clase de peligro “moderado” se estableció para aquel valor del índice, tal que quedaran incluidos en la clase el 25 % de los fuegos.

Gritsenko propuso en 1952 una modificación de este índice, consistente en utilizar para el cálculo el déficit de saturación, corregido por la precipitación ocurrida en los últimos cuatro días.

- Índice de Tellysin

El índice de Tellysin también fue desarrollado en la antigua Unión Soviética. Su ecuación básica es la siguiente:

$$T = \sum \log(t - td)$$

Donde:

T: índice de Tellysin

t: temperatura del aire (°C)

td: punto de rocío (°C)

Si hay una precipitación superior a 2,5 mm el índice se hace cero, y comienza una nueva sumatoria al día siguiente.

- Índice de Monte Alegre o de Soarez

El índice de Monte Alegre fue desarrollado para ecosistemas húmedos del sudeste de Brasil. Su ecuación básica es la siguiente:

$$FMA = 100 \sum \frac{1}{H}$$

Donde:

FMA: índice de Monte Alegre

H: Humedad relativa a las 14 horas

El FMA es un coeficiente acumulativo, que categoriza el peligro de incendios de vegetación, tal como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 4: Escalas de peligro para el Índice de Monte Alegre.

Valor	Grado de peligro
1	Nulo
1.1 – 3	Bajo
3.1 – 8	Medio
8.1 – 20	Alto
+20	Muy alto

Este índice se aplica en la región sudeste de Brasil y en algunas provincias del norte y noreste de Argentina.

3.3 Resultados

A continuación, se muestran diferentes gráficos que nos permiten identificar las ventanas temporales donde los índices presentan los valores más elevados.

Primero se muestra el correspondiente al índice de Nesterov, con los correspondientes umbrales y las estaciones que se han analizado, siempre teniendo en cuenta que son estaciones que brindan sus datos online y en algunos casos presentan falta de datos.

En la Figura 27, se puede observar que los valores en general son bastante elevados, sobrepasando el límite superior a partir del mes de julio. Esta información es tenida en cuenta ya que la mayoría de las estaciones coinciden en este aspecto.

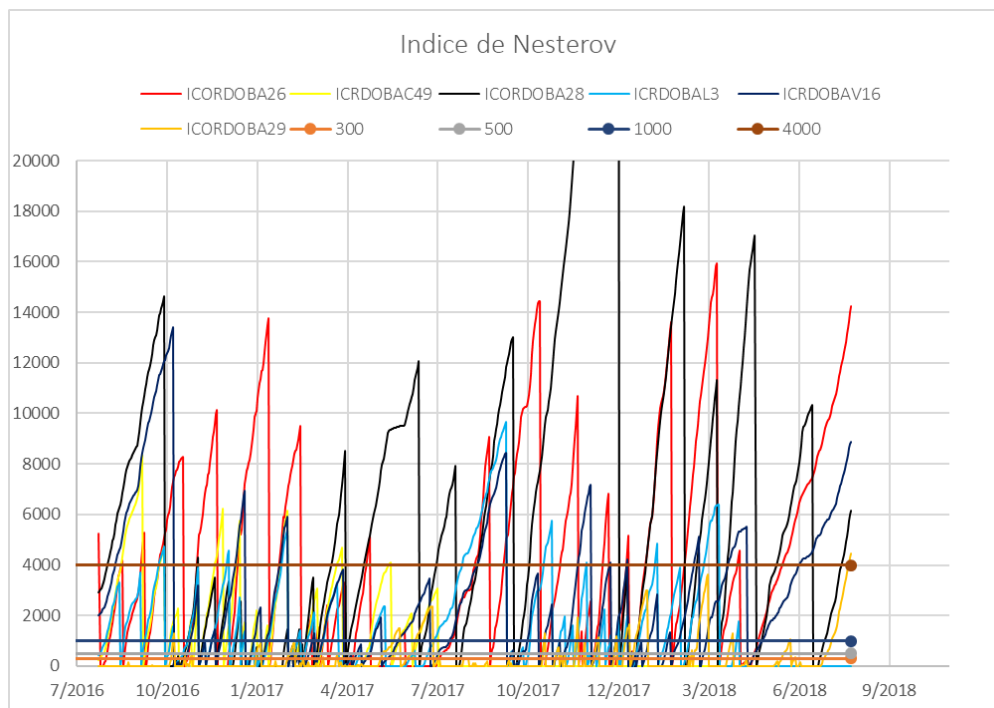


Figura 27: Índice de Nesterov en el período 07/2016 - 07/2018.

Además de esto se realizó un análisis similar aplicando en este caso, el índice de Monte Alegre y se obtuvo el siguiente gráfico.

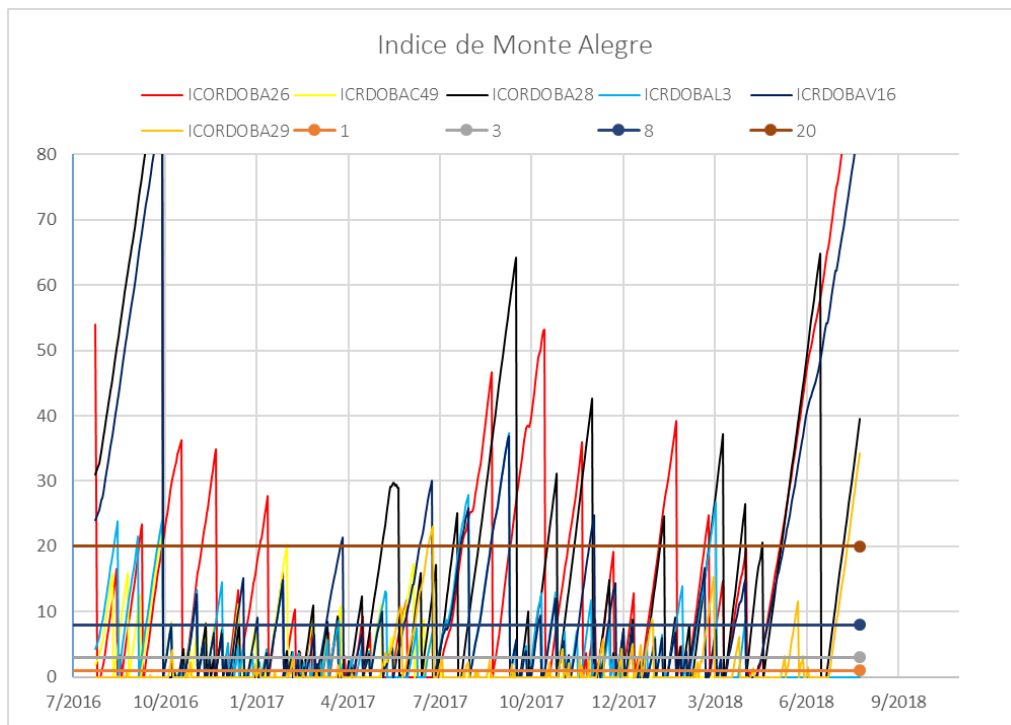


Figura 28: Índice de Monte Alegre en el período 07/2016 - 07/2018.

En la Figura 28, se puede observar más claramente el período crítico en relación al peligro de incendio existente en la zona. Como se mencionó anteriormente corresponde al período posterior al mes de julio, en este caso del año 2017.

Para finalizar se aplicó el índice de Tellysin para realizar una comparación y verificar los resultados anteriores, obteniendo el siguiente gráfico.

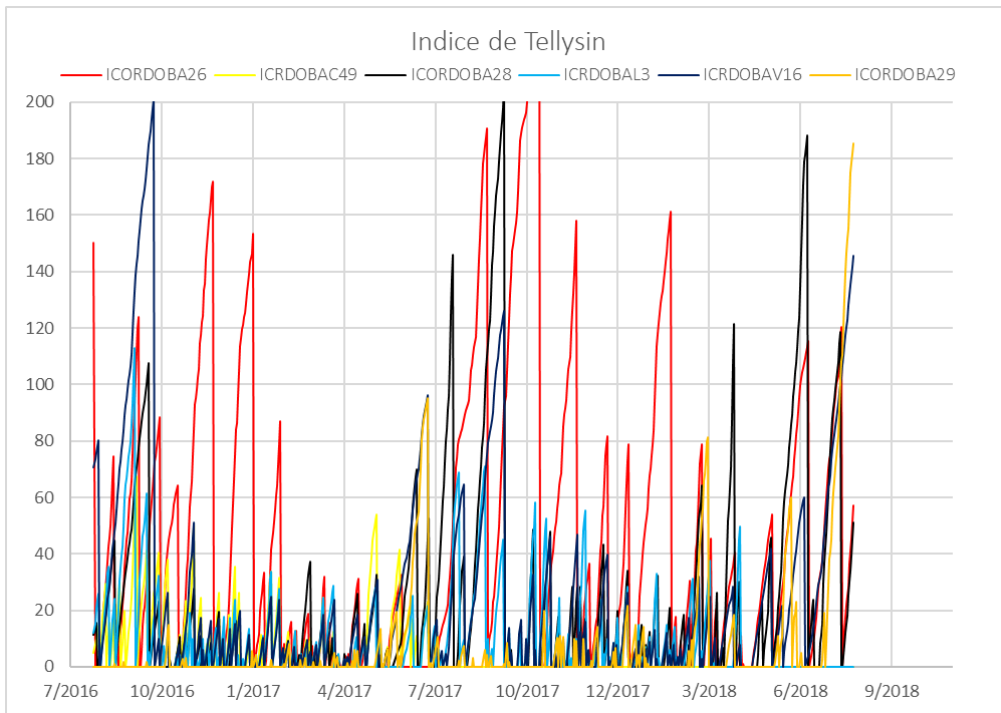


Figura 29: Índice de Tellysin en el período 07/2016 - 07/2018.

Coincidiendo con las apreciaciones anteriores, el análisis de este último índice nos permite confirmar a la segunda parte del año como la etapa más crítica para el análisis. Los gráficos siguientes muestran un acortamiento del período de análisis a un año, a partir del mes de junio del año 2017.

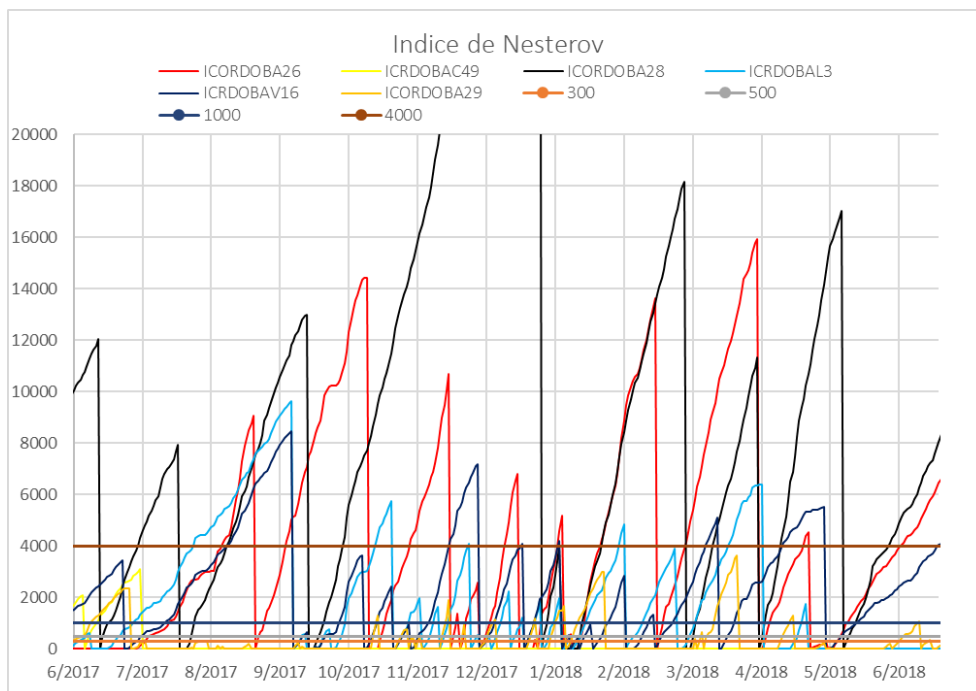


Figura 30: Índice de Nesterov en el período anual 06/2017 - 06/2018.

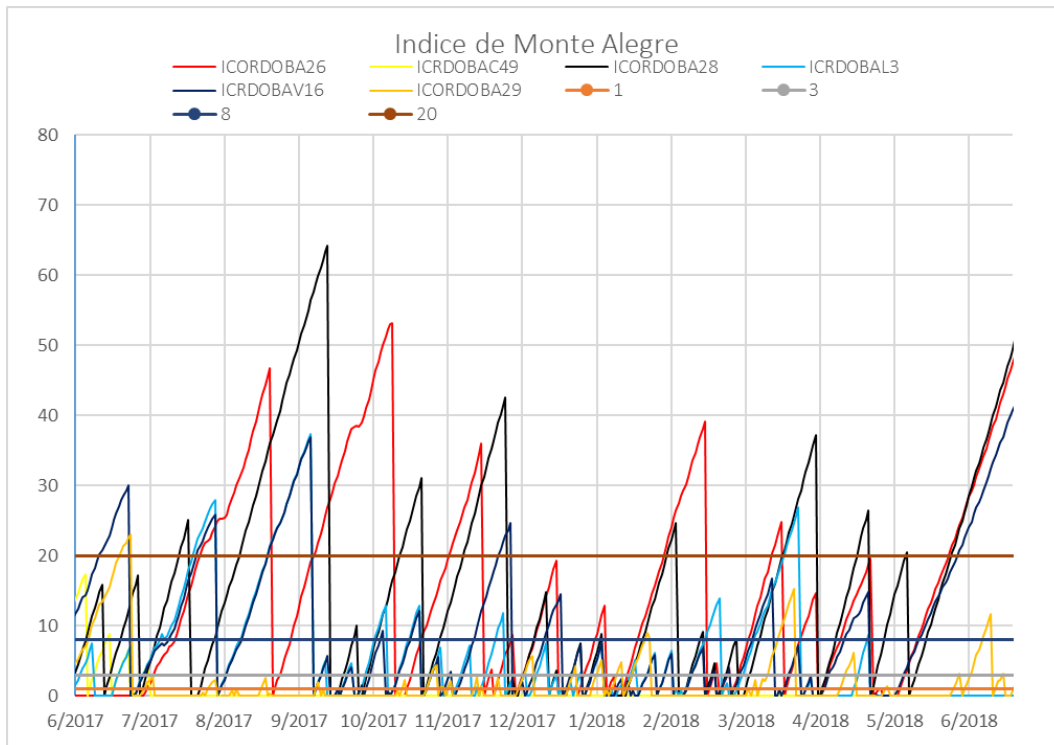


Figura 31: Índice de Monte Alegre en el período anual 06/2017 - 06/2018.

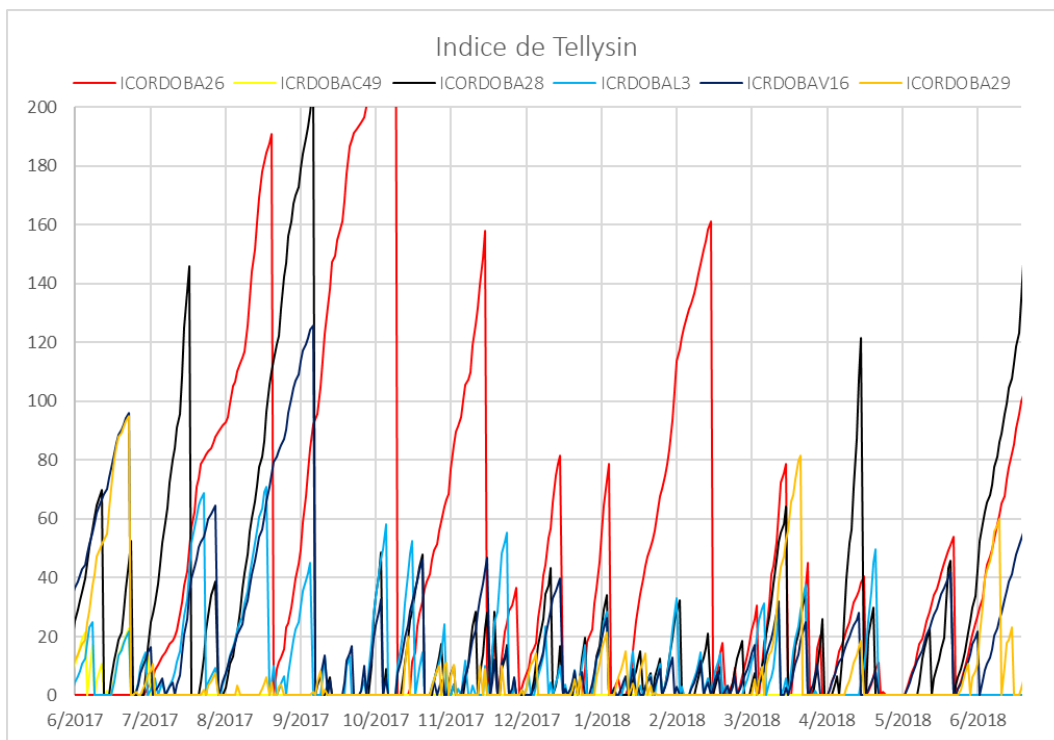


Figura 32: Índice de Tellysin en el período anual 06/2017 - 06/2018.

En la Figura 30, Figura 31 y Figura 32 se puede observar más claramente que la época crítica según estos índices se trataría de los meses de julio, agosto, septiembre y algunos días del mes de octubre.

Un aspecto que tienen en común es que las estaciones con índices más elevados son las estaciones “ICORDOBA28” y “ICORDOBA26”, seguidas por “ICRDOBAL3”. A esto hay que tenerlo en cuenta ya que sus valores son considerablemente mayores y pueden presentar algún error en la medición o instalación.

Para comparar más precisamente los aspectos cuantitativos se realizaron gráficos de barras para cada una de las estaciones analizadas.

Primero se establecieron los diferentes rangos de peligro en los cinco niveles definidos anteriormente. Esto se hizo utilizando los Índices de Nesterov y Monte Alegre, ya que el de Tellysin no presenta rangos estrictamente definidos. Se estableció un conteo de los días que correspondían a cada rango en el año analizado y se organizaron los datos en forma de tabla.

Tabla 5: Número de días correspondientes a cada rango de peligro.

Peligro	ICORDOBA26		ICRDOBAC49		ICORDOBA28		ICORDOBA29		ICRDOBAL3		ICRDOBAV16		PROM	
	N	MA	N	MA	N	MA	N	MA	N	MA	N	MA	N	MA
Nulo	19	18	1	6	3	116	38	28	32	75	32	68	22	69
Bajo	12	10	0	2	6	1	22	12	22	15	20	31	15	14
Medio	24	21	4	7	14	39	24	29	41	59	56	60	34	45
Alto	114	46	27	14	75	60	55	39	116	65	163	66	117	59
Muy Alto	139	213	0	3	245	127	0	31	73	70	69	115	132	131
TOTAL	308	308	32	32	343	343	139	139	284	284	340	340	319	319

En la Tabla 5, se pueden identificar dos estaciones que presentan un número muy bajo de días con datos. En el caso de la estación “ICRDOBAC49” y “ICORDOBA29” tienen menos del 50% de los días con información. Sería importante verificar cual es la razón de esto y no tenerlas en cuenta para elaborar el promedio ya que disminuirían los valores por la falta de información.

Para observar mejor esto se realizó una tabla similar expresada en porcentajes.

Tabla 6: Porcentaje de días correspondientes a cada rango de peligro.

Peligro	ICORDOBA26		ICRDOBAC49		ICORDOBA28		ICORDOBA29		ICRDOBAL3		ICRDOBAV16		PROM	
	N	MA	N	MA	N	MA	N	MA	N	MA	N	MA	N	MA
Nulo	5,21	4,93	0,27	1,64	0,82	31,78	10,41	7,67	8,77	20,55	8,77	18,63	5,89	18,97
Bajo	3,29	2,74	0,00	0,55	1,64	0,27	6,03	3,29	6,03	4,11	5,48	8,49	4,11	3,90
Medio	6,58	5,75	1,10	1,92	3,84	10,68	6,58	7,95	11,23	16,16	15,34	16,44	9,25	12,26
Alto	31,23	12,60	7,40	3,84	20,55	16,44	15,07	10,68	31,78	17,81	44,66	18,08	32,05	16,23
Muy Alto	38,08	58,36	0,00	0,82	67,12	34,79	0,00	8,49	20,00	19,18	18,90	31,51	36,03	35,96
TOTAL	84,38	84,38	8,77	8,77	93,97	93,97	38,08	38,08	77,81	77,81	93,15	93,15	87,33	87,33

Se puede concluir en que en general las estaciones presentan buena cantidad de datos, alrededor de un 80%, exceptuando las dos estaciones mencionadas anteriormente que son descartadas para el análisis siguiente.

Se realizaron gráficos de barras donde se pueden ver los porcentajes de días previstos con el correspondiente riesgo de incendio. Seguidamente se puede ver la figura correspondiente a la estación “ICORDOBA26”, que tiene un porcentaje de datos completos del 85%.

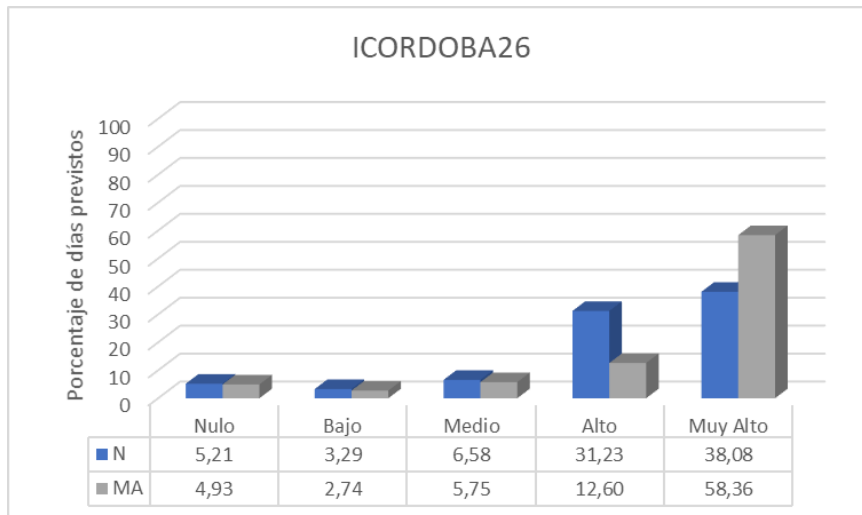


Figura 33: Porcentaje de días previstos con cada rango de peligro en la estación "ICORDOBA26".

Se puede observar en la Figura 33, que en general los valores son altos, pero hay una diferencia entre los índices ya que el Índice de Nesterov presenta un salto a partir del riesgo "Medio" pero se mantiene relativamente constante en los últimos dos niveles. A diferencia de esto el Índice de Monte Alegre, continúa en crecimiento llegando a valores cercanos a un 60% de los días previstos con riesgo "Muy Alto".

Las diferencias anteriores pueden deberse a las diferentes escalas utilizadas, ya que se plantean los valores para un escenario y luego de observarse los incendios producidos en un período, se realizan ajustes sucesivos para que correspondan con el escenario analizado.

La figura siguiente muestra un análisis similar realizado con la estación "ICORDOBA28", la cual presenta los valores más elevados en porcentaje de días con datos, superando el 90%.

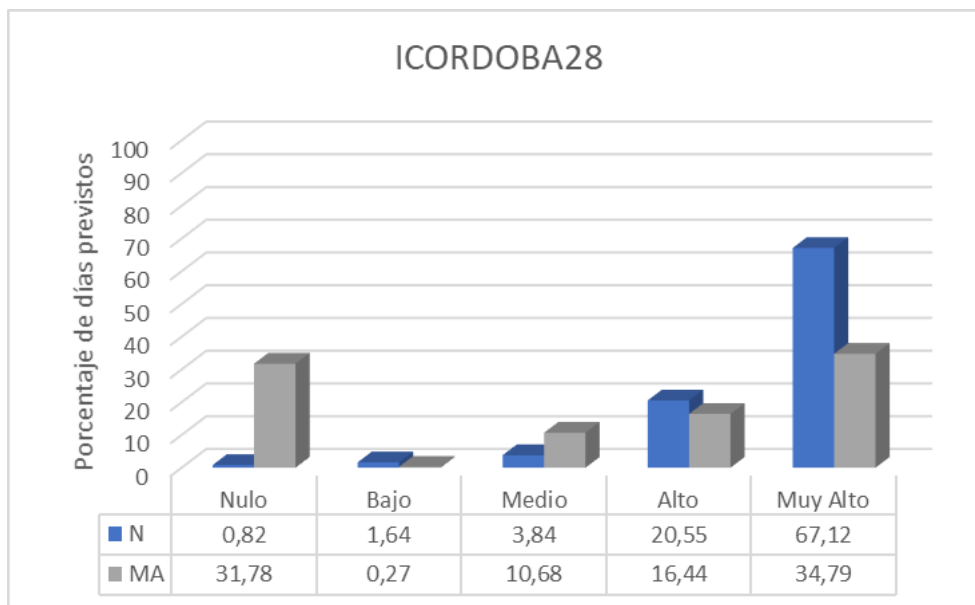


Figura 34: Porcentaje de días previstos con cada rango de peligro en la estación "ICORDOBA28".

Se puede ver claramente un comportamiento muy diferente entre los Índices utilizados. En el caso del Índice de Monte Alegre se observa un valor demasiado elevado en el

rango Nulo, de alrededor del 30%, disminuyendo a un valor nulo en el rango Pequeño y creciendo hasta alcanzar nuevamente un 35% en los rangos más elevados. Por otro lado, en el caso del Índice de Nesterov presenta valores más razonables a simple vista, donde se identifica un crecimiento gradual alcanzando valores muy elevados para el rango de mayor gravedad.

A continuación, se muestra la figura correspondiente a la estación “ICRDOBAL3”, presentando un porcentaje cercano al 80% de días con datos por lo que pueden ser razonables los resultados.

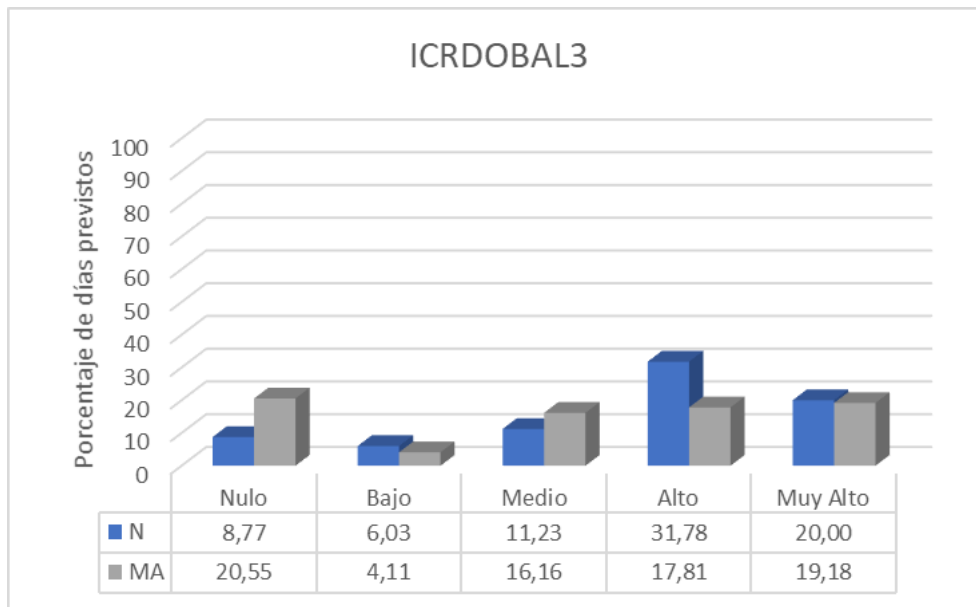


Figura 35: Porcentaje de días previstos en cada rango de peligro en la estación "ICRDOBAL3".

En este caso los valores se observan bastante estables en sus valores. En el caso de los correspondientes al Índice de Monte Alegre se presentan en torno a un 20%. Por otro lado, en el Índice de Nesterov se presentan valores un poco menores, pero con un pico en el rango Alto alcanzando un 30%. En ambos índices se observa un descenso en el rango de peligro Pequeño a valores cercanos a un 5% de los días.

La última estación analizada es la “ICRDOBAV16”, la cual presenta un gran porcentaje de días con datos, cuyo gráfico se muestra a continuación.

En la Figura 36, se puede ver un comportamiento muy similar a la estación anterior. Presentan en general valores estables alrededor de un valor medio. En el caso del Índice de Monte Alegre este valor ronda el 17%, con un valor máximo en el rango más elevado de un 31%. Por otro lado, para el Índice de Nesterov se observa un valor máximo del 45% en el rango Alto, y valores en torno al 15%. En el rango Bajo los Índices dan valores demasiado bajos en torno a un 5% de los días del año previstos.

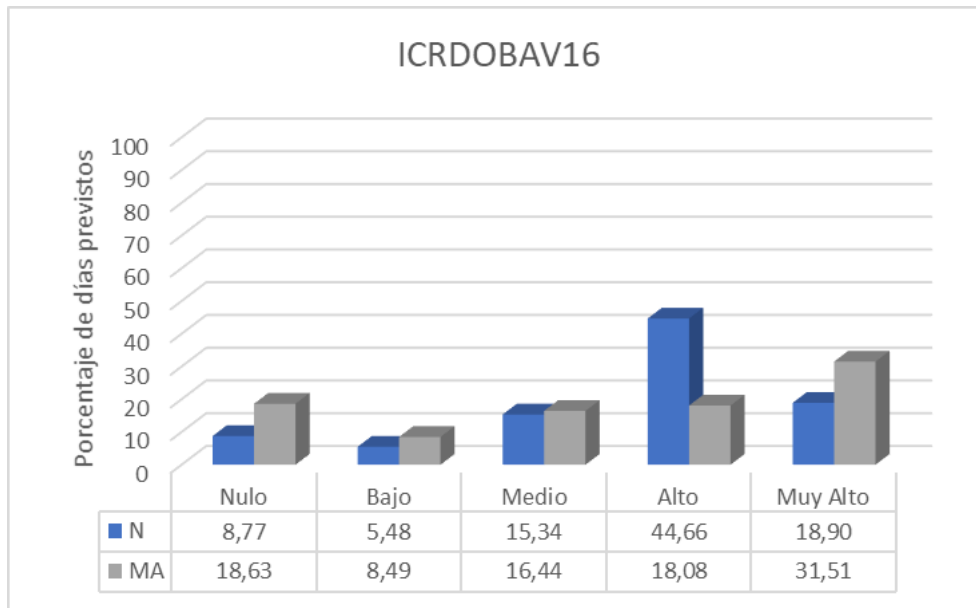


Figura 36: Porcentaje de días previstos en cada rango de peligro en la estación "ICRDOBAV16".

Para realizar un análisis espacial de los resultados se realizaron mapas de incendio correspondiente con cada uno de los Índices, con escalas establecidas para observar los resultados.

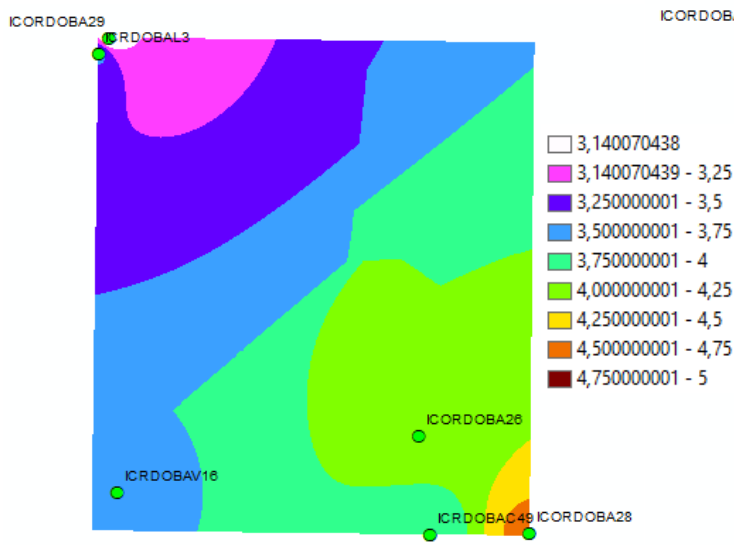


Figura 38: Mapa Índice de Nesterov.

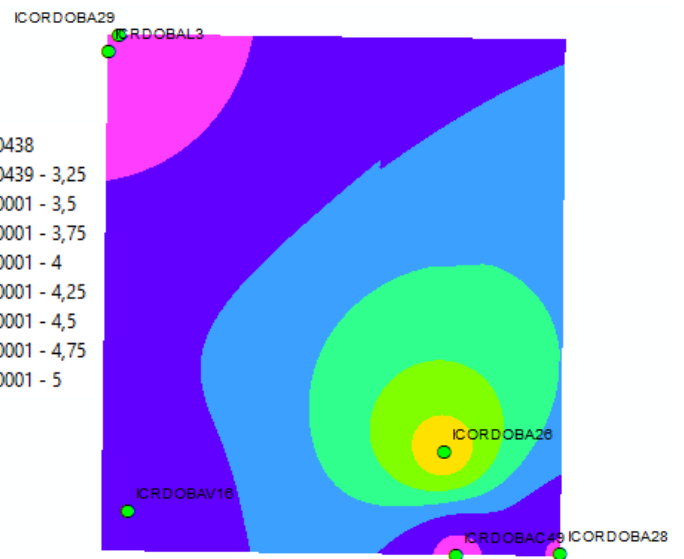


Figura 37: Mapa Índice de Monte Alegre.

Como puede observarse en las figuras anteriores, hay diferencias con la zona donde se registran los valores superiores. En el caso del Índice de Nesterov, los valores mayores se registran en la estación "ICORDOBA28", ubicada en el extremo inferior derecho del mapa. Por otro lado, en el mapa correspondiente al Índice de Monte Alegre, la estación mencionada anteriormente registra uno de los valores más pequeños. Esto confirma lo presentado en los gráficos de barra anteriores donde se observa que para la estación mencionada hay una diferencia de 30 puntos porcentuales en el rango superior.

3.4 Síntesis

A partir de los análisis realizados se puede concluir en que en general los valores obtenidos a partir de los diferentes índices pueden ser correctos. Se debe tener en cuenta que se realizó una primera aproximación y es necesario el ajuste de los diferentes rangos a partir de los diferentes períodos observados. Además de esto sería importante contar con un número mayor de estaciones para obtener así mapas con una resolución más detallada y evitar interpolaciones exageradas.

Por otro lado, en lo que se refiere a los rangos definidos por los índices, en el caso del Índice de Tellysin, se deben ir estableciendo y verificando a través de los análisis realizados. Es por esto que no resulta demasiado valioso para una primera aproximación.

Para realizar el análisis anterior se hace decidido tener en cuenta el porcentaje de días con datos en el período analizado. En el caso de la estación "ICRDOBAC49" y "ICORDOBA29" tienen valores demasiado bajos, menores al 40%, por lo cual no fueron utilizadas para realizar algunos gráficos.

En el caso de las estaciones que presentan buen número de datos provistos, se identifica a la "ICORDOBA28" y "ICORDOBA26", ubicadas en la región inferior derecha del mapa. Las estaciones restantes son la "ICRDOBAL3" y "ICRDOBAL16", pero la principal diferencia entre ambos índices es la diferencia entre las estaciones con valores más elevados, que rondan un 30% de días previstos con el máximo riesgo.

4 MODELACIÓN HIDROLÓGICA

4.1 Introducción

Una de las aplicaciones que puede resultar de gran utilidad es la modelación hidrológica, tomando como datos complementarios los provenientes de las fuentes *No-oficiales* como se mencionó en el primer capítulo. Una simulación o modelación hidrológica de una cuenca representa un grupo de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico, con el objetivo de simular la conversión de la precipitación en escurrimiento.

En el área de estudio del presente trabajo se encuentra el dique San Roque, uno de los reservorios artificiales de mayor relevancia económica en la Provincia de Córdoba. La disponibilidad de herramientas para la gestión de los reservorios de agua es de suma importancia para los tomadores de decisiones, ya que contribuye a la implementación de acciones estratégicas.

En este capítulo se muestran algunas aplicaciones de los modelos realizados en HEC-RAS y HEC-HMS, diferenciando entre las estaciones *Oficiales* y todas las estaciones disponibles, es decir, incluyendo además las *No-oficiales*. Esto permite la comparación de resultados y determinación de la mejora, o no, de la precisión de los mismos.

4.2 Modelos numéricos hidráulicos utilizados

4.2.1 HEC – RAS 5.0.5

Para realizar la modelación hidráulica se utilizó el programa computacional HEC-RAS versión 5.0.5. Este programa fue creado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center, HEC) del Cuerpo de Ingenieros de la armada de los Estados Unidos. El software permite al usuario realizar cálculos hidráulicos unidimensionales 1D y bidimensionales 2D.

HEC-RAS es un sistema integrado de software. El sistema está compuesto por una interfaz gráfica (GUI), componentes de análisis hidráulicos separados, capacidades de almacenamiento y gestión de datos, gráficos, mapeo (HEC-RAS Mapper) e instalaciones de generación de informes.

HEC-RAS contiene cuatro componentes de análisis hidráulicos:

- cálculos de perfil de la superficie de agua para flujo permanente,
- simulación de flujo no permanente 1D y 2D,
- cálculos de transporte de sedimentos con contornos móviles (sedimentos cohesivos y no cohesivos), y
- temperatura del agua y modelado del transporte de contaminantes.

Un elemento clave es que los cuatro componentes utilizan una representación de datos geométricos comunes y rutinas de cálculos geométricos e hidráulicos comunes. Además de los cuatro componentes hidráulicos, el sistema contiene varias características de

diseño hidráulico que se pueden incorporar una vez que se computan los perfiles básicos de la superficie del agua. El software también contiene herramientas para realizar mapeo de inundaciones directamente dentro del software.

Aplicaciones de Áreas 2D

Las áreas de flujo 2D en HEC-RAS se pueden usar de varias maneras. Los siguientes son ejemplos de cómo las áreas de flujo 2D se pueden usar con el modelo con HEC-RAS.

- Modelado detallado de canales 2D y llanuras de inundación
- Canales 1D combinados con área de llanuras de inundación 2D
- Canales 1D y llanuras de inundación combinados con áreas de flujo 2D aguas abajo de diques
- Conectando directamente un modelo 1D con áreas 2D aguas abajo del mismo
- Conectar directamente un área de flujo 2D y un área de almacenamiento 1D con una estructura hidráulica
- Crear múltiples áreas de flujo 2D en la misma geometría
- Conectar múltiples áreas de flujo 2D con estructuras hidráulicas
- Análisis de Dam Breach
- Análisis de Levee Breach
- Régimen de flujo mixto. La capacidad 2D (así como la 1D) puede calcular y combinar flujos supercrítico y subcrítico.

Las capacidades de enrutamiento de flujo 2D en HEC-RAS se han desarrollado para permitir al usuario realizar modelado 2D o combinado 1D / 2D. El algoritmo de modelado de flujo 2D en HEC-RAS tiene las siguientes capacidades.

1. Puede realizar modelaciones 1D, 2D y combinar modelos 1D y 2D: HEC-RAS puede realizar modelado 1D, modelado 2D (sin elementos 1D), y combinar modelos 1D y 2D. El modelo combinando 1D y 2D permite realizar, por ejemplo: analizar el desborde e inundación de las márgenes de un río. Donde se modela en 1D el cauce del río principal y en 2D las áreas que requieren un nivel más alto de hidrodinámica (planicies de inundación).
2. Ecuaciones de Saint-Venant o de Onda Difusiva en 2D: El programa resuelve las ecuaciones 2D de Saint Venant (con adiciones de momento opcionales para efectos de turbulencia y coriolis) o las ecuaciones de Onda Difusiva 2D. En general, las ecuaciones de Onda Difusiva 2D permiten que el software funcione más rápido y tenga mayor estabilidad. Las ecuaciones 2D de Saint-Venant son aplicables a una gama más amplia de problemas. Sin embargo, muchas situaciones de modelado se pueden modelar con precisión con las ecuaciones de Onda Difusiva 2D.
3. Algoritmo de solución Implícito de Volúmenes Finitos: El solucionador de ecuaciones de flujo impermanente 2D utiliza el algoritmo de Volúmenes Finitos. El algoritmo de solución implícito permite pasos de tiempo computacionales más grandes que los métodos explícitos. El método de Volúmenes Finitos proporciona una mayor estabilidad y robustez, mejorados respecto a las técnicas

de diferencias finitas y de elementos finitos. La inundación y el drenado de las células 2D son muy robusto. Las áreas de flujo 2D pueden comenzar completamente secas y manejar una repentina corriente de agua en el área. Además, el algoritmo puede manejar regímenes de flujo subcríticos, supercríticos y mixtos (flujo que pasa a través de profundidad crítica, como un salto hidráulico).

4. Algoritmo de solución acoplada 1D y 2D: Los algoritmos de solución 1D y 2D se acoplan para cada paso de tiempo con una opción para iterar entre transferencias de flujo 1D y 2D dentro de un paso de tiempo. Esto permite la retroalimentación directa cada vez que se pasa entre los elementos de flujo de 1D y 2D. Por ejemplo, considere un río modelado en 1D con el área detrás de un levee modelado en 2D (conectado hidráulicamente con una estructura lateral). El flujo sobre el levee (estructura lateral) se calcula con el nivel del río 1D y un colector de la zona de flujo 2D a la que está conectado. La ecuación del vertedero se usa para calcular el flujo sobre el levee. En cada paso del tiempo, la ecuación del vertedero usa los resultados 1D y 2D o calcula el flujo permitiendo una contabilidad precisa de la sumersión del vertedero, en cada paso de tiempo, a medida que se llena el área interior. Además, el flujo puede retroceder nuevamente hacia el cauce (desde el área 2D hasta el 1D), en la rama descendente del hidrograma.
5. Mallas computacionales no estructuradas o estructuradas: El software fue diseñado para usar mallas computacionales no estructurales, pero también puede manejar mallas estructuradas. Una malla estructurada se procesa igual que una malla no estructurada, excepto que el software aprovecha las celdas que son ortogonales entre sí (es decir, esto simplifica algunos de los cálculos requeridos). Esto significa que las celdas computacionales pueden ser triángulos, cuadrados, rectángulos o incluso elementos de cinco y seis lados (el modelo está limitado a elementos de hasta ocho lados). La malla puede ser una mezcla de formas y tamaños de células. El límite exterior de la malla computacional se define con un polígono. La malla computacional no necesita ser ortogonal, pero si la malla es ortogonal, la desratización numérica se simplifica y es más eficiente.

Para definir los valores de curva número (CN) de las sub-cuencas se necesitan datos de uso y tipo de suelo.

Para el tipo de suelo, teniendo en cuenta que según el método de pérdidas del SCS – CN se dividen los tipos de suelo en 4 categorías, a continuación, se caracteriza cada una de ellas:

- Grupo A: arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.
- Grupo B: suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.
- Grupo C: margas arcillosas, o bien arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y con alto contenido de arcilla.
- Grupo D: suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

Del SIG de la base de datos “Suelos de la República Argentina - Escala 1-500.000” del INTA, pueden obtenerse las cartas para extraer los diferentes suelos en las zonas a analizar.

En el análisis realizado el Uso de Suelo es muy importante ya que se trata de áreas urbanizadas por lo que se elevó el valor de CN. En general los valores utilizados fueron entre 80 y 85.

A continuación, se muestran los mapas y esquemas realizados para la posterior modelación y obtención de resultados. Se realizaron diferentes alternativas, considerando las lluvias del día 08 de mayo del año 2018 y del 12 de noviembre del mismo año.

El primer paso consistió en identificar la zona de influencia de cada una de las estaciones, y reflejarlo en la superficie de la zona de estudio, obteniendo los resultados que se muestran en las imágenes a continuación. Las estaciones utilizadas son:

Tabla 7: Estaciones utilizadas para la modelación.

FUENTE	ID	DESCRIPCION
WU	IPUNILLA14	Estancia vieja
	IPUNILLA2	Los Manantiales
	ICRDOBAV16	Jose Muñoz
	IVILLACA18	Playas de Oro
	IPUNILLA11	San antonio de Arredondo
	ICRDOBAP10	TierrAlta
	IVILLACA11	Dante Alighieri
	IPUNILLA5	Altos del Durazno
sgainacir sa	100	Santo Tomas
	200	Puesto Pereyra
	600	Bo. El Canal
	700	Confluencia El Cajón
	1100	Villa Carlos Paz
	2900	Villa Caeiro
	3051	Rep Cerro Minero
	4100	Confluencia Saldan
	4200	Chateau
	4400	El Diquecito
magya		Los Chorrillos
		Arroyo Los Quebrachitos

Por otro lado, es necesario utilizar un Modelo Digital de Elevación. En este caso se aplicó el aerofotogramétrico 5m, de IGN. El mismo se obtiene a partir de vuelos aerofotogramétricos llevados a cabo con el siguiente equipamiento:

- a) una cámara digital Vexcel UltraCamXp,
- b) un sistema de navegación GNSS y,
- c) un sistema inercial IMU.

El IGN ha desarrollado una línea de producción que le permite la determinación precisa de los parámetros de orientación externa de los fotogramas, la aerotriangulación por haces de rayos, y finalmente, la generación de un MDE. Los MDE aerofotogramétricos refinados que distribuye el IGN tienen una resolución espacial de 5m y una precisión vertical submétrica.

4.2.1.1 Modelación de precipitaciones día 8 de mayo

Como se mencionó anteriormente, se presentan los mapas que se obtuvieron a partir de las áreas de influencia de cada una de las estaciones de medición. Posteriormente los mismos fueron demarcados en el modelo de elevación digital, para realizar la modelación. A continuación, se muestran los resultados utilizando las estaciones *Oficiales*.

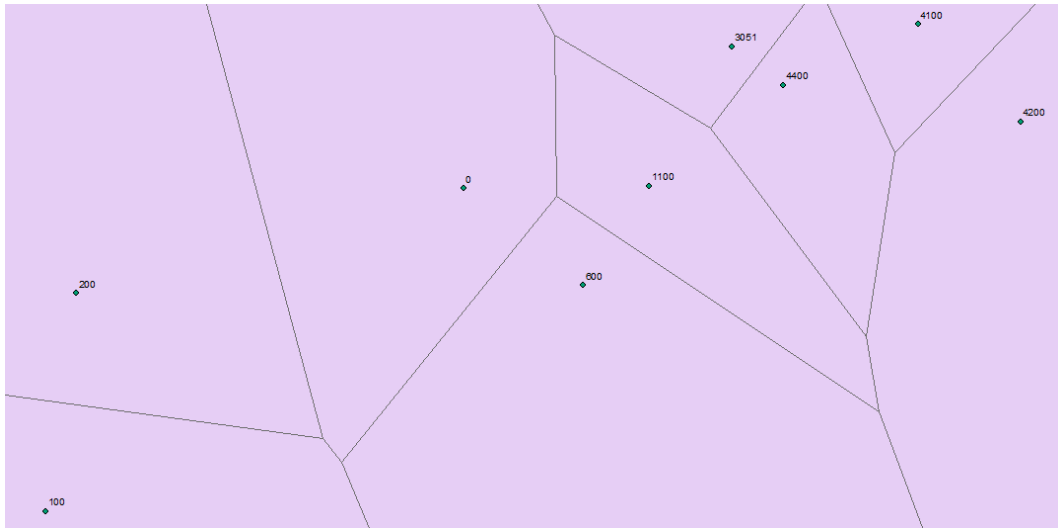


Figura 39: Áreas de influencia de estaciones *Oficiales*.

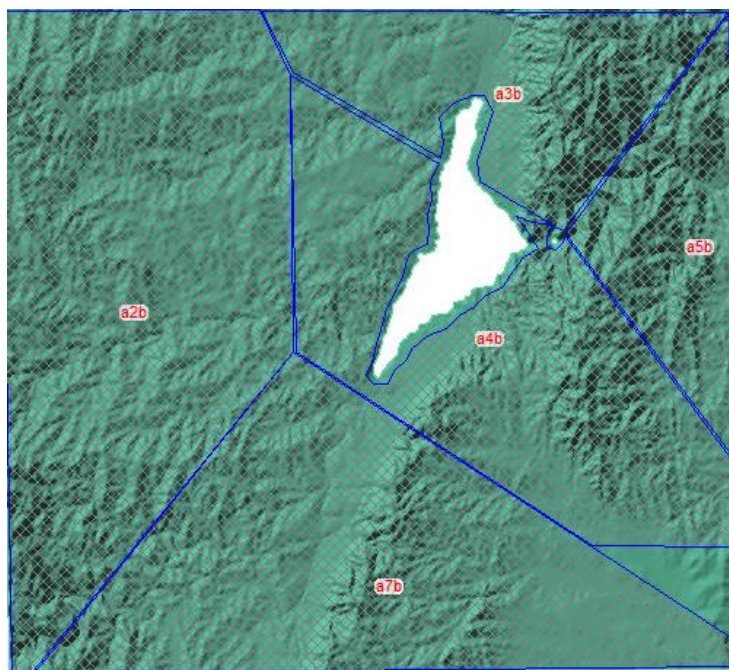


Figura 40: Delimitación de áreas de influencia en el modelo de elevación digital.

Al incluir la información complementaria de las estaciones *No-oficiales*, se obtuvieron las siguientes delimitaciones del área de influencia.

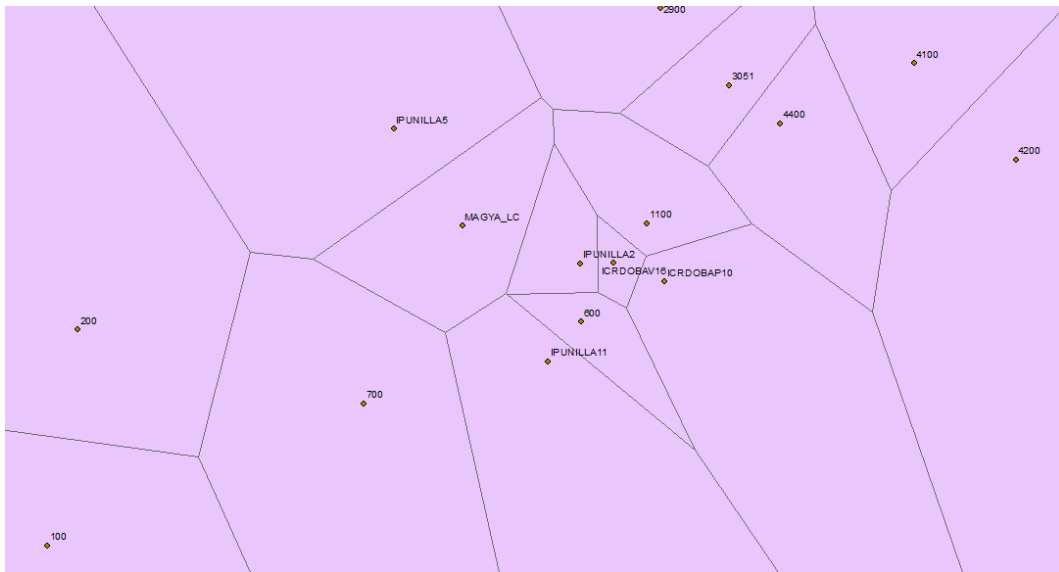


Figura 41: Áreas de influencia de todas las estaciones disponibles.

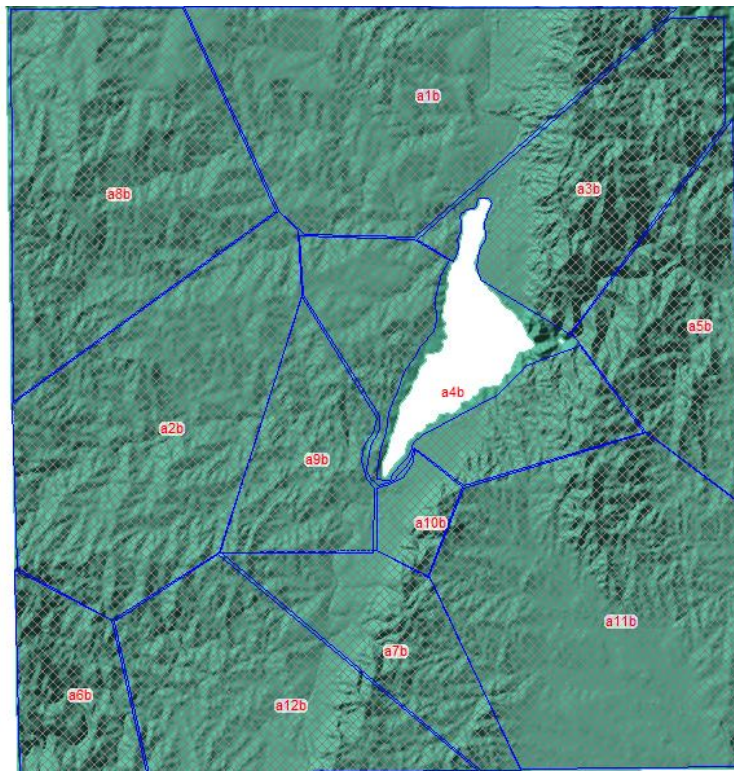


Figura 42: Delimitación de áreas de influencia en el modelo de elevación digital.

Como se observa en las imágenes anteriores, al contar con un mayor número de estaciones, se obtiene una red más densificada, con áreas más pequeñas de influencia correspondiente a cada una de las estaciones.

4.2.1.2 Modelación de precipitaciones día 12 de noviembre

Se realizó un análisis similar al anterior, pero utilizando los registros de precipitaciones del día 12 de noviembre.

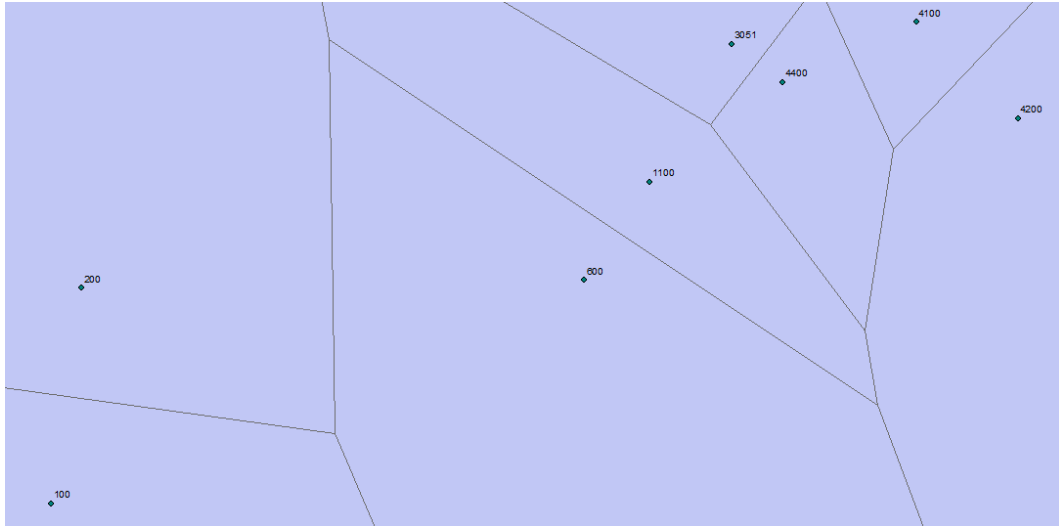


Figura 43: Áreas de influencia de estaciones Oficiales.

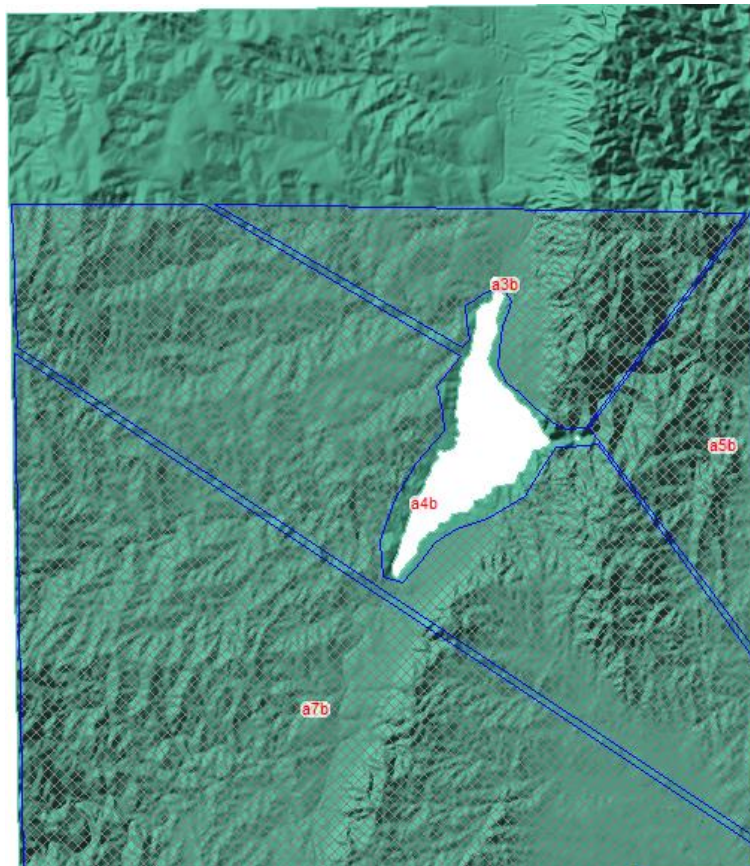


Figura 44: Delimitación de áreas de influencia en el modelo de elevación digital.

Al igual que en el caso anterior se agregaron las estaciones *No-oficiales* disponibles obteniendo una mayor densificación de las fuentes de datos.

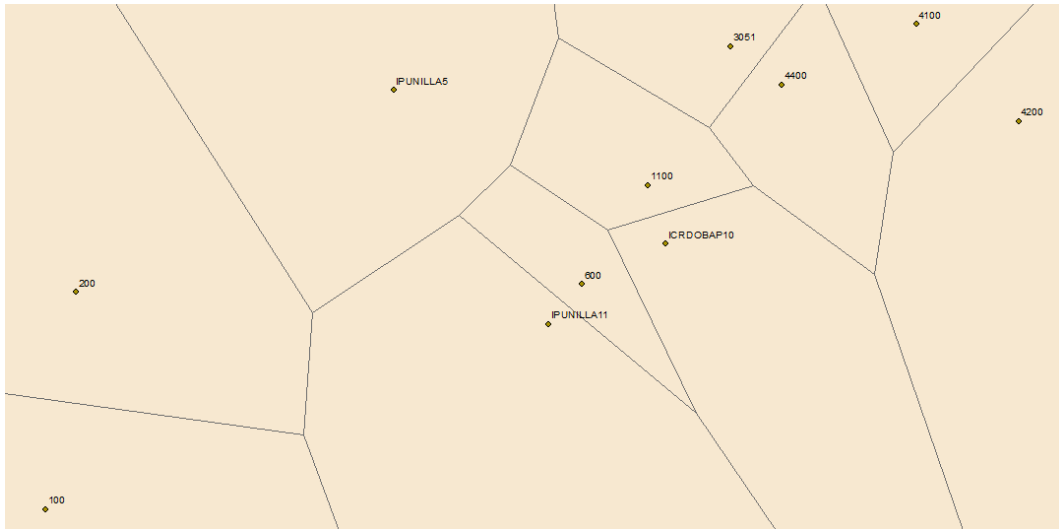


Figura 45: Áreas de influencia de todas las estaciones disponibles.

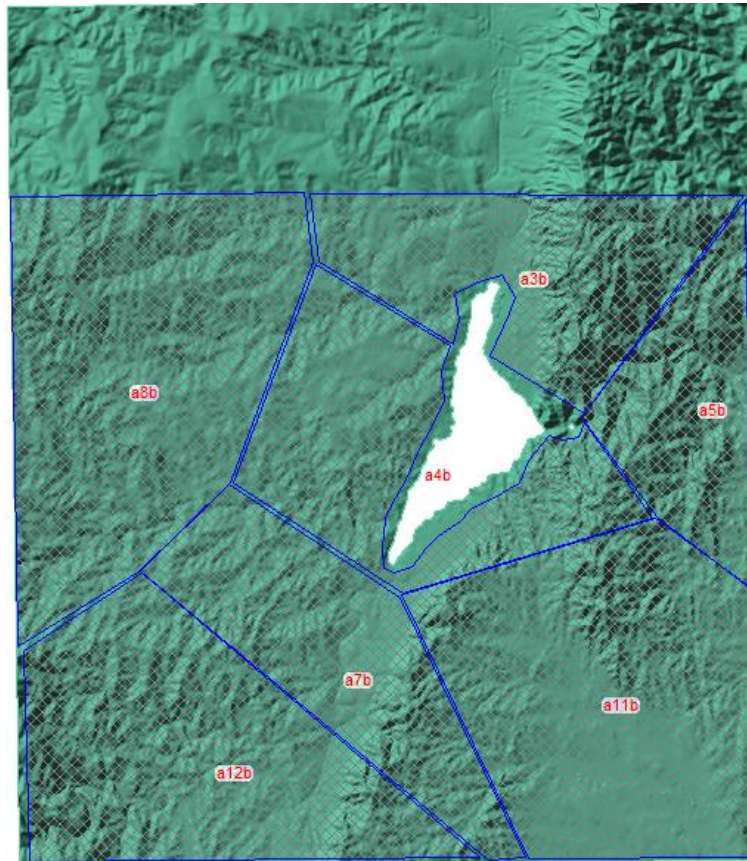


Figura 46: Delimitación de áreas de influencia en el modelo de elevación digital.

4.2.2 HEC – HMS

Para verificar la mejora en los resultados, aumentando el número de estaciones, se aplicó el modelo realizado previamente, utilizando la herramienta computacional Hydrologic Engineering Center's - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), considerando un modelo agregado y por evento. El propósito fue la cuantificación de dicho escurrimiento superficial para el diseño hidrológico se estimó a través de la

utilización de datos históricos de lluvia (alrededor de la zona de estudio) y modelos de transformación lluvia-caudal (P-Q).

Debido a las limitaciones de este tipo de simulación, en el modelo la cuenca se encuentra dividida en subcuencas para tener una mejor representación de los procesos hidrológicos. Cada subcuenca fue considerada como si fuese una sola entidad, con una única entrada de lluvia, y donde el caudal de salida se reproduce a partir de una dinámica global del sistema. Vale aclarar, que se trata de modelos de eventos aislados, es decir, diseñados para simular eventos individuales de crecida.

Es ampliamente conocido que la simulación hidrológica rara vez es capaz de simular perfectamente la respuesta de la cuenca. La diferencia entre la respuesta simulada y la respuesta real observada se denomina incertidumbre y puede variar desde muy pequeña a excesivamente grande. La incertidumbre suele deberse a una combinación de factores que incluyen datos meteorológicos inadecuados, incongruencias en la representación del modelo de los procesos físicos y errores en la identificación de los valores de los parámetros del modelo. En menor grado, los errores en la observación de la respuesta de la cuenca también pueden contribuir a la incertidumbre del modelo. Una evaluación cuantitativa de la incertidumbre del modelo es un componente clave para determinar la confiabilidad de las predicciones del modelo y crítico para usar las predicciones con las metodologías de ingeniería basadas en el riesgo.

En este apartado se detalla la metodología que se empleó en el presente estudio hidrológico, con el objetivo principal de caracterizar la cuenca alta del Río Suquía, la cual aporta al lago en estudio, mediante este modelo poder realizar un análisis de sensibilidad para las diferentes cotas de espera y para diferentes periodos de retorno. Los temas abordados se presentan a continuación, en forma sintética:

1. **Delimitación de cuenca:** a través de modelos digitales de elevación de terreno (DEM), imágenes satelitales, Cartas del Instituto Geográfico Nacional (IGN), recorridos a campo y mediante información brindada por profesionales que trabajan en la zona se delimitaron las cuencas y subcuencas de aporte.
2. **Determinación de parámetros morfométricos:** en función de los recorridos realizado en campo, imágenes satelitales e información topográfica, se definieron: áreas de cuenca y subcuencas, pendientes; longitudes y pendientes de líneas de escurrimiento.
3. **Caracterización de la cuenca:** se identifica a través de diferentes fuentes y metodologías los suelo, la vegetación y la condición de humedad antecedente de la cuenca de estudio y el tipo de suelo.
4. **Determinación de parámetros hidrológicos:** en base a información recopilada hasta aquí, se definieron: abstracciones iniciales y números de curvas (CN), tiempos de concentración, tiempos de retardo, métodos de tránsito y de cada subcuenca.
5. **Lluvia de diseño:** se definieron las lluvias de diseño para distintas recurrencias. Para lo cual se determinó la magnitud de la lámina como así también su distribución temporal y espacial empleando el modelo DIT.
6. **Calibración de parámetros hidrológicos:** la calibración se debe realizar mediante un evento medido en la zona de estudio, debido a que no hay ningún evento medido que abarque toda la zona de estudio, se optó por

calibrar el modelo con la curva V-d-T correspondiente a la duración de un día y así ajustar los valores de CN del modelo.

7. **Simulación hidrológica:** a través del programa HEC-HMS desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (USACE), se modeló la cuenca de interés con los parámetros mencionados, para obtener las diferentes cotas del embalse, asociados a los diferentes escenarios planteados.

Para realizar las simulaciones se plantearon diferentes alternativas, teniendo en cada una de ellas diferente número de estaciones. Se decidió modelar por separado a las estaciones *Oficiales* y *No-oficiales*, para posteriormente combinarlas y observar si se registran diferencias en los resultados.

La delimitación de la cuenca utilizada se muestra en la Figura 47.

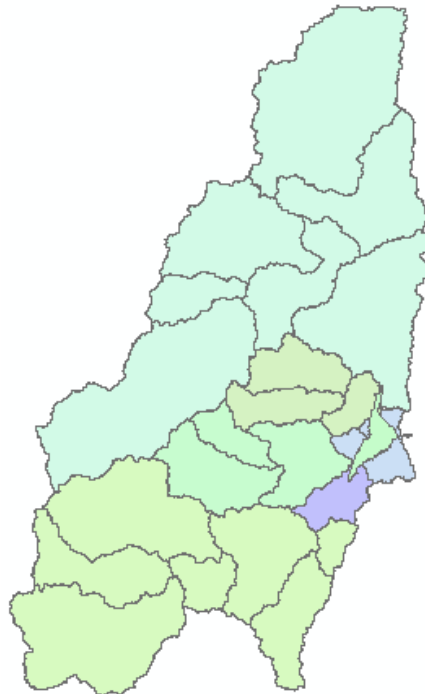


Figura 47: Delimitación de las subcuencas obtenida del modelo utilizado.

A la imagen de la figura anterior, se superpusieron las áreas de influencia de cada una de las estaciones y luego se cargaron las precipitaciones correspondientes al día 12 de noviembre del año 2018.

En las figuras siguientes, se muestran los dos escenarios analizados en la simulación hidrológica con HMS. Cabe resaltar que en las proximidades a la zona del Lago San Roque la densidad de estaciones se pudo incrementar enormemente.

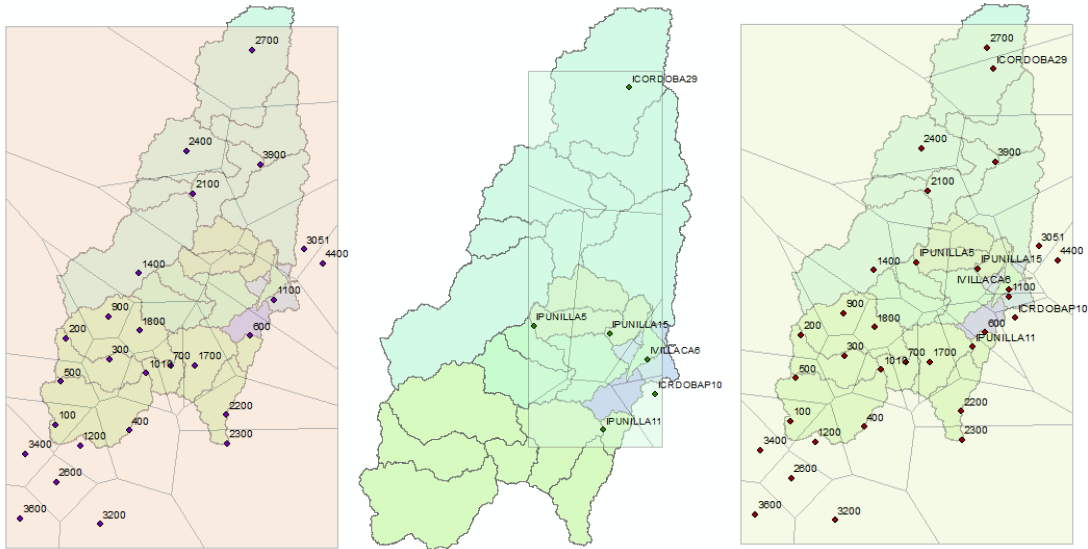


Figura 48: Superposición de las áreas de influencia de las estaciones en las subcuencas delimitadas. Izquierda: Estaciones Oficiales. Centro: Estaciones No-oficiales. Derecha: Estaciones Oficiales y No-oficiales.

4.3 Resultados

4.3.1 HEC-RAS

A continuación, se muestran las imágenes obtenidas de la modelación, tanto las profundidades máximas como velocidades para cada caso.

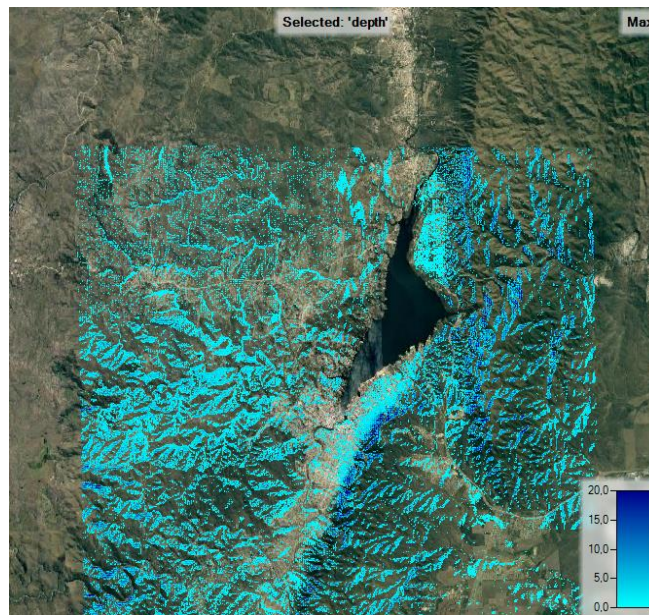


Figura 49: Resultados de profundidades máximas para precipitaciones registradas el día 08/05 por estaciones Oficiales.

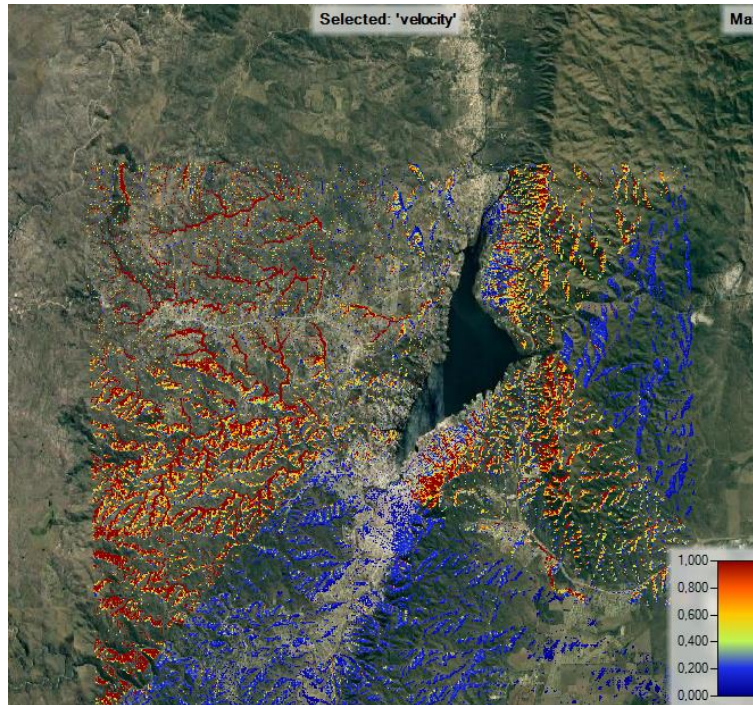


Figura 50: Resultados de velocidades máximas para precipitaciones registradas el día 08/05 por estaciones Oficiales.

En las figuras anteriores se puede observar como, en las zonas más elevadas se registran las profundidades máximas. Además de esto, se registran las velocidades máximas en las zonas montañosas, lo cual resulta lógico.

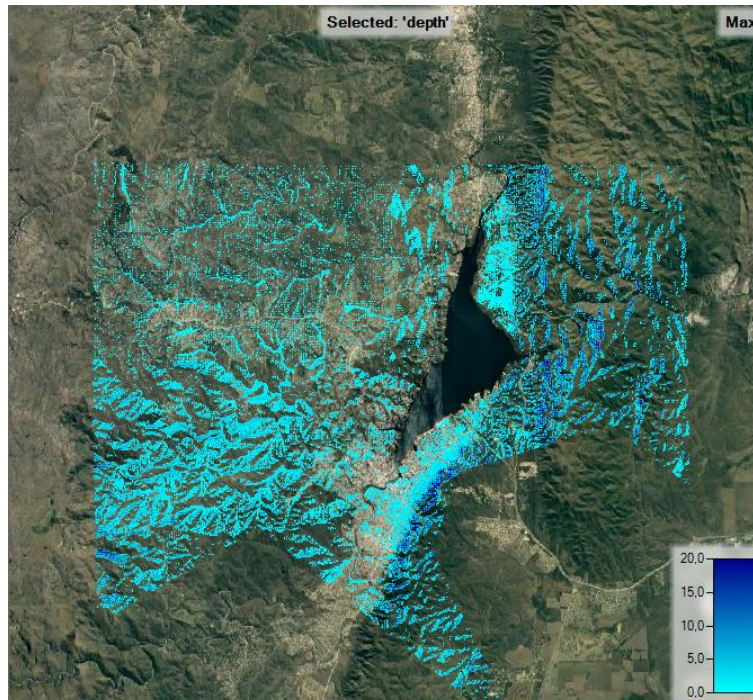


Figura 51: Resultados de profundidades máximas para precipitaciones registradas el día 08/05 por estaciones Oficiales y No-oficiales.

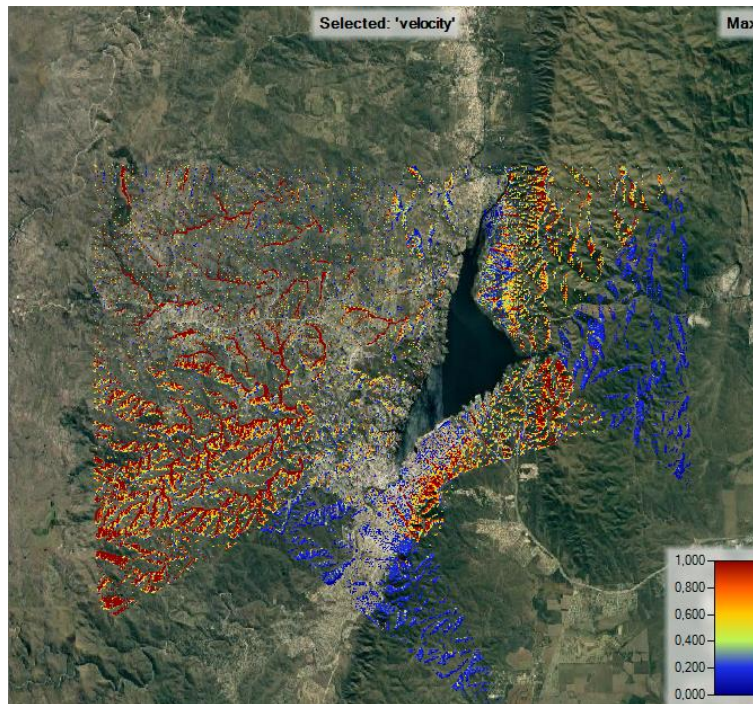


Figura 52: Resultados de velocidades máximas para precipitaciones registradas el día 08/05 por estaciones Oficiales y No-oficiales.

Cuando se incorporan las estaciones *No-oficiales*, se logra una mayor resolución, pero los resultados no difieren sustancialmente. Las profundidades máximas se registran en las zonas elevadas, lo cual nos permite inferir que los errores se deben a otra razón.

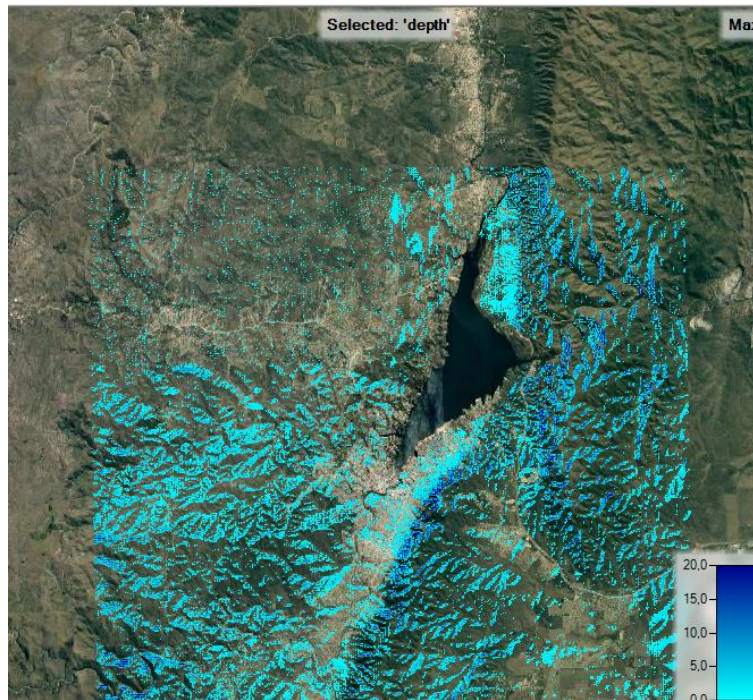


Figura 53: Resultados de profundidades máximas para precipitaciones registradas el día 12/11 por estaciones Oficiales.

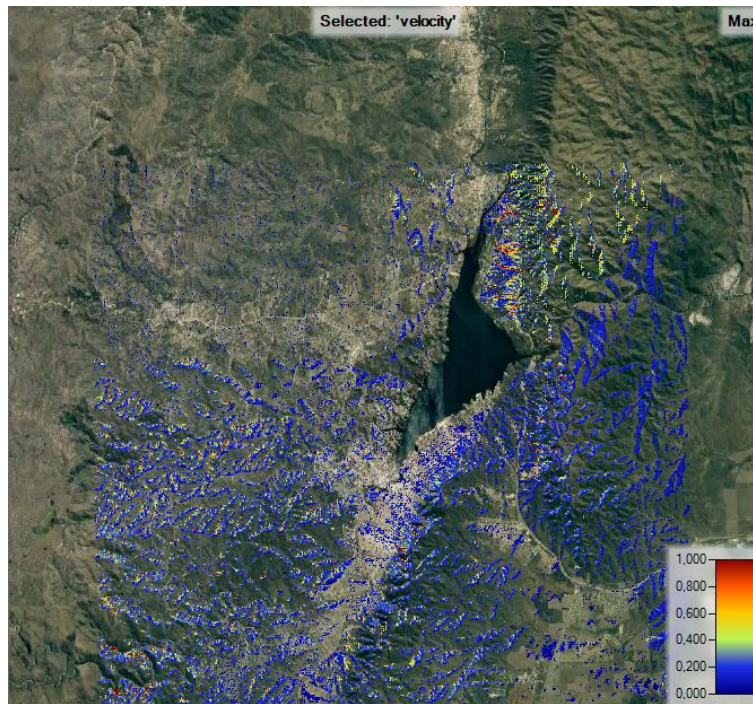


Figura 54: Resultados de velocidades máximas para precipitaciones registradas el día 12/11 por estaciones Oficiales.

En el caso de las precipitaciones del 12 de noviembre, se puede ver una distribución similar en el caso de las profundidades máximas, mientras que en lo que refiere a las velocidades, se registran valores menores a las del evento anterior.

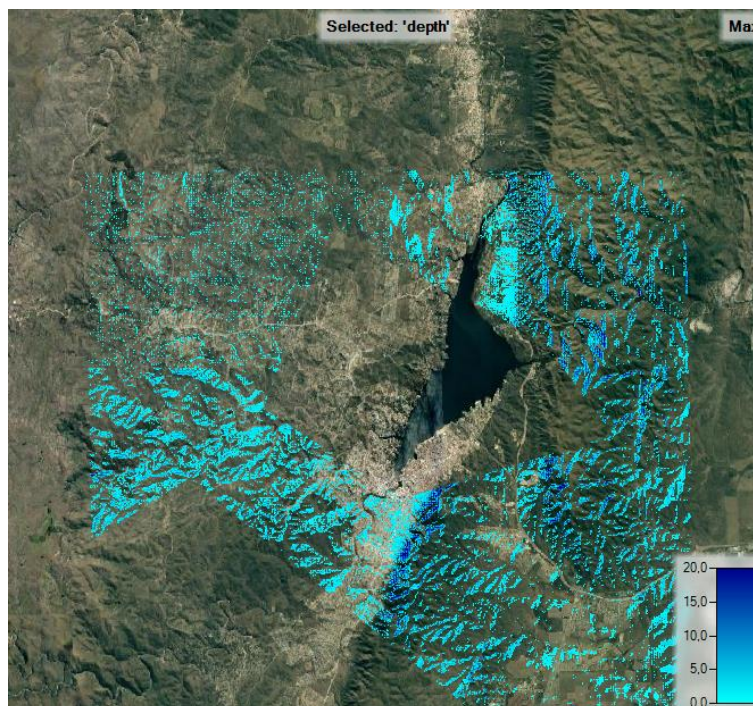


Figura 55: Resultados de profundidades máximas para precipitaciones registradas el día 12/11 por estaciones Oficiales y No-oficiales.

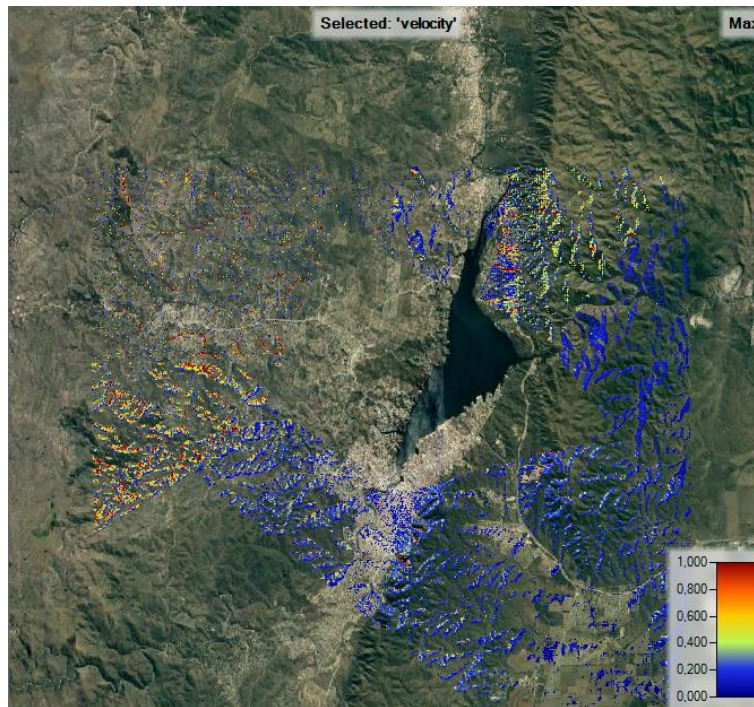


Figura 56: Resultados de velocidades máximas para precipitaciones registradas el día 12/11 por estaciones Oficiales y No-oficiales.

Al igual que en el caso anterior, al incorporar las estaciones *No-oficiales*, la resolución mejora identificando algunas áreas con precipitaciones efectivas muy bajas, pero las profundidades máximas continúan registrándose en las zonas elevadas.

Como se observa en las figuras anteriores los resultados no reflejan claramente lo que se espera, conociendo el relieve de la zona. Se muestran grandes profundidades en zonas altas y puede deberse a la inexactitud del modelo de elevación utilizado ya que se trata de una zona montañosa con relieves pronunciados.

4.3.2 HEC-HMS

A continuación, se muestran los diferentes resultados obtenidos en el modelo, utilizando las estaciones *Oficiales*, *No-oficiales* y todas las estaciones disponibles. Se pueden ver en las imágenes los Caudales Observados en líneas de color negro y, por otro lado, en azul los Caudales simulados para el evento.

En este caso se simuló las precipitaciones registradas el día 12 de mayo del año 2018.

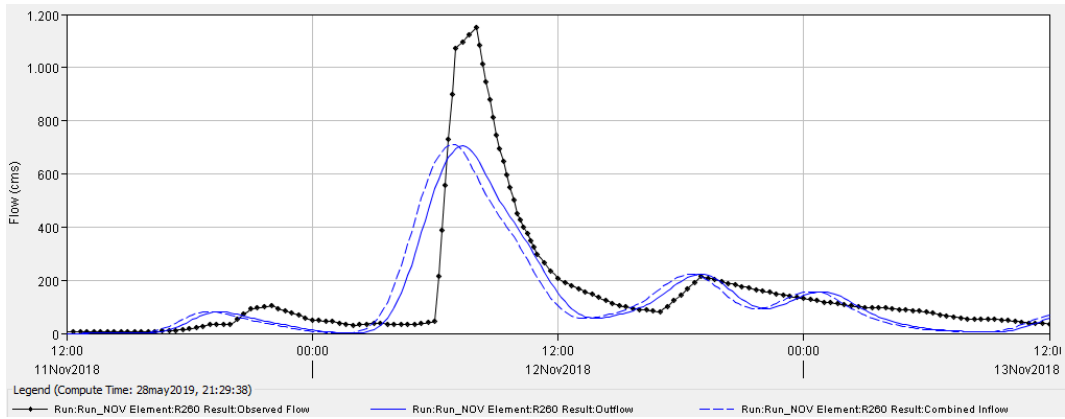


Figura 57: Resultados de la modelación de cauce utilizando las precipitaciones registradas en estaciones Oficiales.

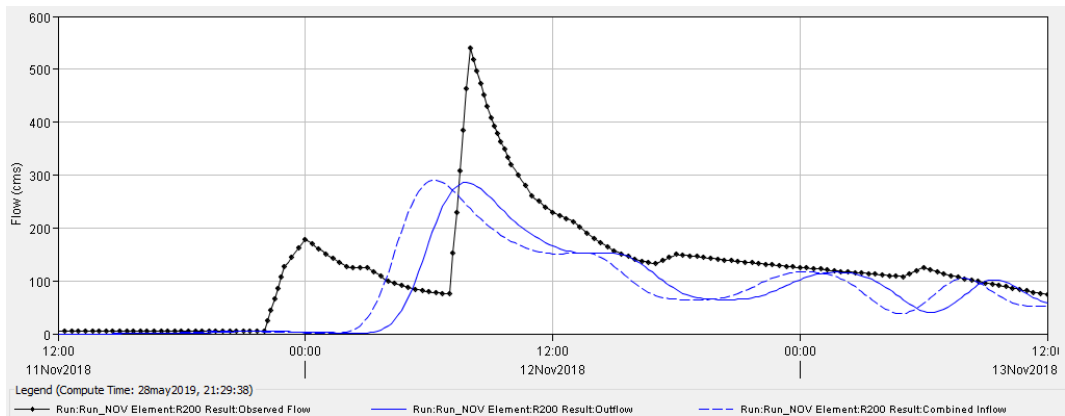


Figura 58: Resultados de la modelación de cauce utilizando las precipitaciones registradas en estaciones Oficiales.

En la Figura 58 y en la Figura 59 60 puede observarse claramente como los Caudales simulados para el evento son inferiores a los observados. En este caso aplicando los datos de las estaciones Oficiales.

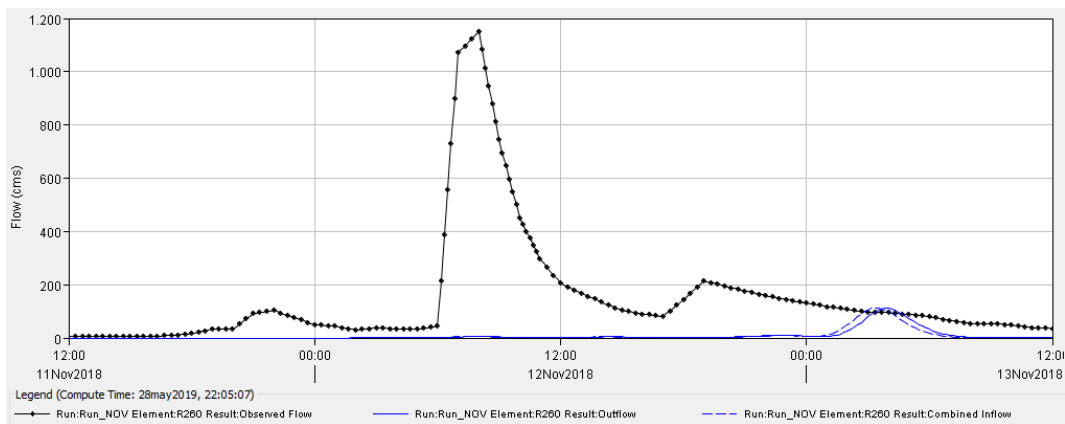


Figura 59: Resultados de la modelación de cauce utilizando las precipitaciones registradas en estaciones No-oficiales.

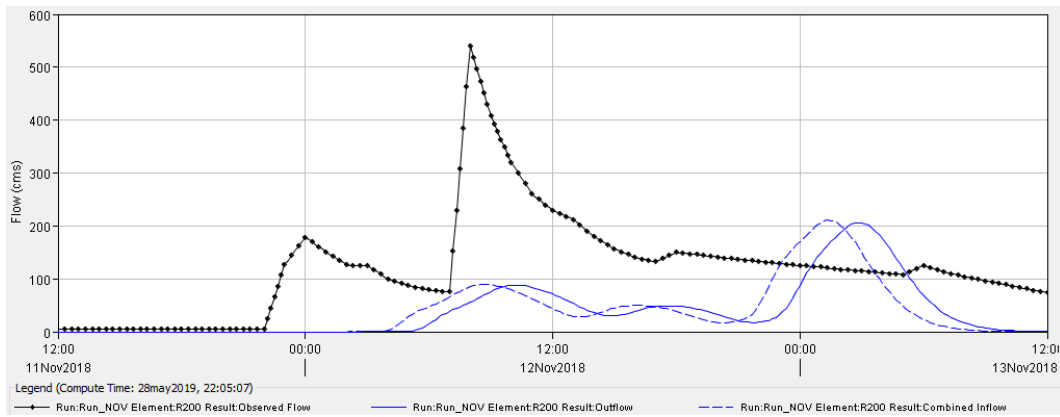


Figura 60: Resultados de la modelación de cauce utilizando las precipitaciones registradas en estaciones No-oficiales.

En la Figura 59 y en la Figura 60, se observa una diferencia aún mayor a la anterior entre los caudales simulados y observados, utilizando las estaciones *No-oficiales*.

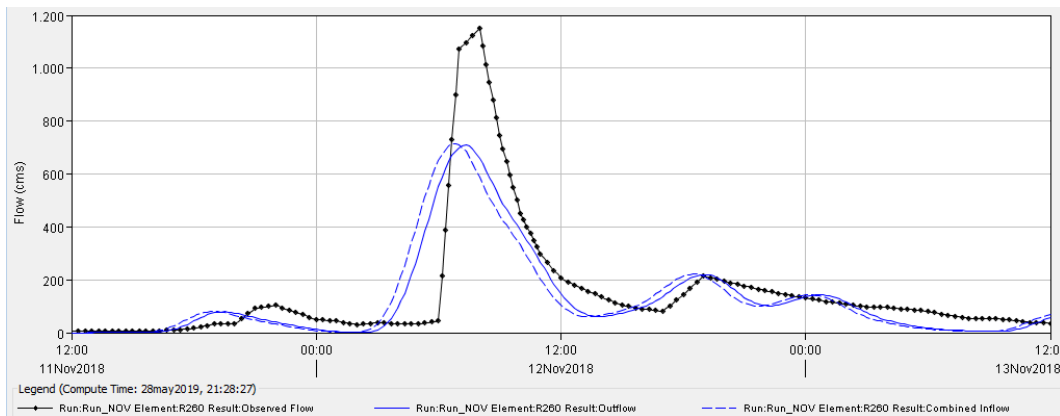


Figura 61: Resultados de la modelación de cauce utilizando las precipitaciones registradas en estaciones Oficiales y No-oficiales.

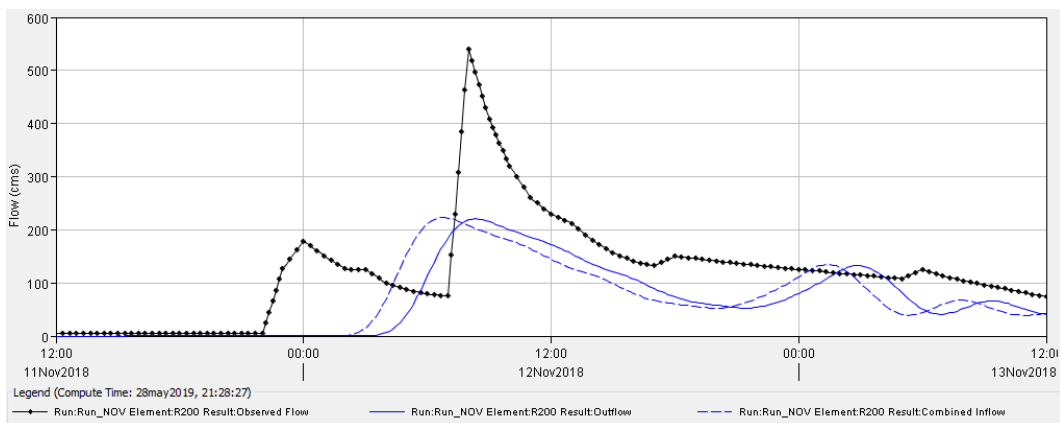


Figura 62: Resultados de la modelación de cauce utilizando las precipitaciones registradas en estaciones Oficiales y No-oficiales.

Como puede observarse en las figuras anteriores los resultados que más se acercan a los observados son los correspondientes a las estaciones *Oficiales*. Esto puede deberse a diferentes causas, como por ejemplo que el modelo fue calibrado originalmente con estas estaciones. Sería recomendable, calibrar nuevamente el modelo en función de las

nuevas estaciones disponibles, ya que los caudales se mantienen distantes de los caudales observados.

4.4 Síntesis

En el capítulo se muestran los resultados de dos aplicaciones hidrológicas, que pueden resultar útiles si se complementa la información obtenida de las fuentes *No-oficiales*.

En general se logra una mayor densificación de la zona de estudio y así una mayor precisión a la hora del registro de las precipitaciones, pero a pesar de esto no se puede observar una mejora clara en los resultados. Esto puede deberse a diferentes razones, pero si se continúa aumentando el número de estaciones, se mejorarán los resultados obtenidos progresivamente hasta alcanzar valores confiables.

En el caso del modelo utilizando HEC-RAS, los errores pueden deberse al DEM utilizado ya que al tratarse de una zona montañosa es conveniente realizarle algunos ajustes previo a la aplicación del mismo.

Por otro lado, en los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo HEC-HMS, calibrado previamente, se puede determinar que los valores registrados por las estaciones *No-oficiales* son inferiores y puede deberse a la inestabilidad en el envío de los datos e interrupciones, como se analizó en el capítulo 2.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se evalúan mediciones hidro-meteorológicas generadas por el proyecto MATTEO y otras fuentes de colaboración abierta y distribuida (crowdsourcing), tomando como referencia estaciones oficiales de instituciones nacionales y provinciales. De este modo, se compararon precipitaciones acumuladas y temperatura por ambos grupos de estaciones.

Los resultados muestran que la colaboración abierta y distribuida (crowdsourcing), es una herramienta valiosa para involucrar al público, y si se implementan procedimientos apropiados de validación y control de calidad, tiene mucho potencial para proporcionar una fuente importante de datos en tiempo real de alta resolución temporal y espacial, especialmente en regiones donde existen pocas observaciones, lo que agrega valor a la ciencia, la tecnología y la sociedad.

Además de esto se realizaron comparaciones de los diferentes instrumentos utilizados para realizar las mediciones de precipitaciones, validando los resultados obtenidos por Pluviómetros Totalizadores, lo que significa un considerable ahorro si las condiciones de instalación son las adecuadas.

Por otro lado, se aplicaron los datos obtenidos a la determinación de diferentes Índices de incendio, lo cual es una problemática importante en la zona de estudio. Los resultados de una primera aproximación demuestran que, si bien se cuenta con un buen número de estaciones en la zona, las variables necesarias para la determinación de los mismos, requieren mayor control en los equipos. A pesar de esto, y contar con un bajo número de estaciones que puede resultar poco significativo, se muestran algunas herramientas interesantes como el mapa para observar espacialmente los riesgos potenciales.

Por último, en el caso de las aplicaciones en modelos hidrológicos, no fue posible lograr una mejora considerable en los resultados, aunque se mejore la densificación de la red. A pesar de esto puede mejorarse ampliamente y en un futuro contribuir de gran manera.

6 BIBLIOGRAFÍA

Álvarez J. (2018) “**Análisis de la disponibilidad de agua superficial ante distintos escenarios de oferta y demanda en la Cuenca del Río San Antonio, Provincia de Córdoba**” Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería: Mención en Recursos Hídricos. Universidad Nacional de Córdoba.

Dentoni M. C.; Muñoz M. M. (2012) “**Sistemas de evaluación de peligro de Incendios**”. Plan Nacional de Manejo del Fuego; Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable.

Ferreira D. F. (2018) “**Desarrollo de herramienta para la gestión del recurso hídrico en el embalse san roque, Córdoba, Argentina.**” Práctica supervisada de la carrera ingeniería civil. Universidad Nacional de Córdoba.

Muller C. L.; Chapman L.; Johnston S.; Kidd C.; Illingworth S.; Foody G.; Overeem A. y Leigh R. R. (2015) “**Crowdsourcing for climate and atmospheric sciences: current status and future potential.**” *International Journal of Climatology*. Doi: 10.1002/joc.4210.

Rodríguez, M.P.R. (2012) “**Desempeño de los índices de Nesterov, Fórmula de Monte Alegre y Fórmula de Monte Alegre alterada en la Empresa Forestal Macurije, Pinar del Río, Cuba.**” Tese (Pós-doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Rodríguez M. R. “**Estimación de umbrales de inundación a partir de las lluvias de diseño.**” Practica supervisada de la carrera de ingeniería civil. Universidad Nacional de Córdoba.

de Vos L.; Leijnse H.; Overeem A.; and Uijkenhoet R. (2017) “**The potential of urban rainfall monitoring with crowdsourced automatic weather stations in Amsterdam**” *Hydrol. Earth. Syst. Sci.* Doi: 10.5194/Hess-21-765-2017.