

Estudio cualitativo de las tormentas presentadas en el Área Metropolitana de Guadalajara durante el año 2020.

Armando I. Mancilla⁽¹⁾, Roberto C. Pacheco⁽²⁾, José de J. Martínez⁽³⁾, Julio A. Márquez⁽⁴⁾, Noe Ledezma⁽⁵⁾.

Asesora: Alma D. Ortíz.

Departamento de Física. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco 44430, México.

9 de noviembre de 2021

⁽¹⁾armando.mancilla7491@alumnos.udg.mx, ⁽²⁾roberto.pacheco4073@alumnos.udg.mx,

⁽³⁾jose.martinez6246@alumnos.udg.mx, ⁽⁴⁾julio.marquez9118@alumnos.udg.mx, ⁽⁵⁾noe.ledezma3970@alumnos.udg.mx.

Resumen: El Área Metropolitana de Guadalajara es una zona de conurbación conformada por varios municipios, entre ellos, Guadalajara, Zapopan, Tlajomulco. Gracias al radar Doppler que se encuentra en el Instituto de Astronomía y Meteorología, podemos estudiar las condiciones meteorológicas de la zona. Con los datos proporcionados por este radar, haremos una descripción cualitativa del comportamiento y características de las tormentas que se produjeron durante el año 2020 en el AMG, ayudándonos de una bitácora. Con esto, determinamos los patrones existentes en las tormentas, considerando las temporadas del año, el relieve y otros factores que se describirán. Además de esto, hablamos sobre las zonas más propensas a las tormentas explicando las razones de esto a partir de los factores.

Palabras clave: Doppler, tormenta, reflectividad, imágenes, AMG.

1. Introducción

El Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) es un espacio de conurbación compuesto por los municipios de Guadalajara, Zapopan, Tlajomulco de Zúñiga, San Pedro Tlaquepaque, Tonalá, El Salto, Zapotlanejo, Juanacatlán, Ixtlahuacán de los Membrillos y Acatlán de Juárez [1]. Debido a la gran zona que contempla el Área Metropolitana, y al gran número de habitantes que la comprenden, es importante el estudio de la meteorología en la región, dado que intensas tormentas pueden afectar la infraestructura de la zona y dificultar el desarrollo de las actividades de los pobladores.

Uno de los artefactos más utilizados actualmente para el estudio de las condiciones meteorológicas es el radar Doppler, que utiliza el efecto del mismo nombre para determinar la velocidad radial. Con esto, este tipo de radares puede determinar la reflectividad para determinar la intensidad de las tormentas.

Gracias al radar Doppler situado en el Instituto de Astronomía y Meteorología, se puede tener un registro de las condiciones atmosféricas que acontecen en el AMG, pudiendo analizar las características

del estado del tiempo y otorgando datos para predicciones del estado del tiempo.

Usando los datos proporcionados por este instituto [2], estudiaremos, principalmente de forma cualitativa, las tormentas que se generaron en los meses con mayor presencia de estas. Para realizar este estudio, nos ayudaremos de una bitácora que elaboramos donde se recolectan las características más importantes de las tormentas como: su intensidad, el tipo de tormenta que sea, las regiones que afectó, su movimiento, entre otros.

Las tormentas, de forma general, se pueden dividir en tres grupos: las unicelulares, las multicelulares y las supercelulares. Las primeras tienen una corta duración y no generan más que lluvias ligeras, las segundas pueden crear lluvias fuertes y granizo, pudiendo durar unas cuantas horas, las últimas se asocian con fenómenos de tiempo severo, representando un daño tanto para la infraestructura como para la población, teniendo un tiempo de vida de horas. Aprender a reconocer cada una de estas tormentas facilita la caracterización y nos da una idea de su desarrollo y su comportamiento.

El radar Doppler es un tipo de radar meteorológico que usa el efecto Doppler en los ecos de

retorno de blancos para medir su velocidad radial y la reflectividad de los objetos de la atmósfera. Existen diferentes tipos de imágenes que podemos obtener por el radar, durante este trabajo estaremos utilizando únicamente imágenes del tipo PPI (Plan Position Indicator), que nos muestra la intensidad de las tormentas en un plano alrededor del radar.

En esta investigación, se espera explicar adecuadamente las imágenes que se obtienen del radar Doppler, uniendo las interpretaciones de tormentas individuales en un análisis de las tormentas presentadas en los meses con mayor frecuencia de lluvias, a lo largo del año 2020, en el Área Metropolitana de Guadalajara. Dentro de este estudio se describen características tales como el lugar donde ocurren con más frecuencia, los horarios en los que ocurren, las duraciones que suelen tener, las intensidades y la presencia de fenómenos de tiempo severo como tornados y granizo. Además, se busca determinar la existencia de patrones que presenten estas tormentas, que puedan darnos un acercamiento a predecir su formación o el desarrollo que tendrán.

Para facilitar esta labor de caracterización, se desarrolla una bitácora donde sea sencillo recopilar los análisis de las tormentas individuales, separándola por secciones de sus características principales y agregando imágenes de estas.

2. Marco Teórico

Para interpretar adecuadamente las imágenes del radar Doppler de las tormentas que se producen en el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG), es importante definir la teoría detrás de esto.

Primeramente, debemos ser capaces de diferenciar los tipos de tormentas con los que nos podemos encontrar, que se dividen en tormentas unicelulares, multicelulares y supercelulares.

Igualmente debemos entender el funcionamiento del radar Doppler y qué información es capaz de proporcionarnos.

La cizalladura es el cambio del vector viento a una determinada altura o conforme cambia la altura, en el respectivo trabajo se trabajaron solo con cizalladura horizontal al contar solo con información de la primera elevación.

La tormenta que experimenta poca o ninguna cizalladura del viento producirá una corriente ascendente vertical, que rápidamente se extinguirá con la lluvia. Por otro lado, la tormenta que experimenta una fuerte cizalladura del viento desarrollará una corriente ascendente inclinada con la lluvia alejándose

de la corriente ascendente.

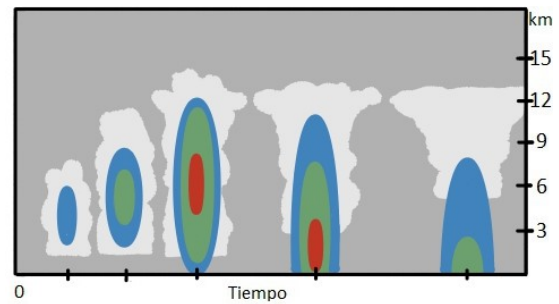
La fuerte cizalladura del viento es un indicador principal de tormentas eléctricas de larga duración y potencialmente severas.

El frente de racha es un fenómeno que forma parte del ciclo de vida habitual de una tormenta, consiste en una ráfaga intensa que se produce en la frontera entre el aire frío procedente de una tormenta y el aire del entorno. Generalmente lleva asociados un aumento brusco en la presión, un giro del viento y un descenso de la temperatura, y a veces también precipitación fuerte. [8]

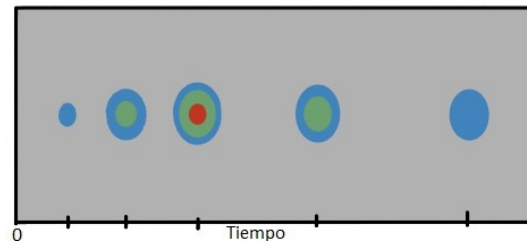
2.1. Tipos de tormentas.

2.1.1. Tormentas ordinarias o unicelulares.

Este tipo de tormenta es una única célula, pueden presentar tres etapas principales definidas: la formación, la madurez y la disipación. A diferencia del resto de tormentas, tienen una duración bastante corta, en comparación, y no suelen medir más de 10 km de ancho [4].



(a) Sección longitudinal (RHI).



(b) Sección transversal (PPI).

Figura 1: Diagrama de las etapas de desarrollo de una tormenta unicelular. (Diagrama original).

La etapa de formación comienza con una sola corriente de aire cálido ascendente que es menos densa que el aire de alrededor, siendo su cizalladura débil. En esta etapa, existe una convergencia de la humedad en la capa superior. Cuando se llega a la etapa de madurez, las gotas se precipitan generando una corriente de aire descendente que, a su vez, al combinarse con el aire seco inferior, crean un efecto de enfriamiento que se extiende como un frente de racha. Cuando se llega a la etapa de disipación, la corriente descendente corta el suministro de aire húmedo ascendente.

Generalmente, estas tormentas no duran demasiado y solo producen lluvias leves, pero también es posible que produzcan fenómenos como los rayos, lluvias fuertes y granizo.

2.1.2. Tormentas multicelulares.

Una tormenta multicelular es un conjunto de células que se encuentran en distintas etapas de desarrollo. La combinación del flujo de aire frío de todas las células produce un frente de racha estrecho y, a su vez, una convergencia de humedad en el sentido de movimiento de la tormenta, que forma nuevas células detrás del frente [4]. La cizalladura de este tipo de tormentas suele ser moderada, propiciando una baja interacción de las corrientes de las células individuales con las corrientes de otras. Su tiempo de duración suele ser más largo por el desarrollo de las nuevas células. Eventualmente, la corriente ascendente se separa de la descendente, haciendo que la tormenta se comience a disipar.

Por su nivel de cizalladura y por ser un conjunto de distintas células, estas tormentas pueden producir fenómenos como granizo, lluvias intensas, actividad eléctrica y tornados débiles.

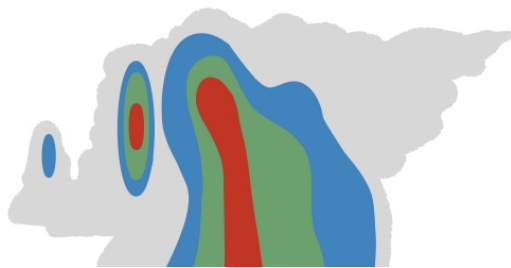


Figura 2: Diagrama de la composición de una tormenta multicelular (RHI). (Diagrama original).

2.1.3. Tormentas supercelulares.

Las tormentas supercelulares se caracterizan por una fuerte cizalladura que produce una corriente as-

cedente giratoria llamada mesociclón. Su tiempo de vida es bastante largo y puede llegar a ser de varias horas. Este tipo de tormenta no suele ser común pero las regiones tropicales, generalmente, contienen condiciones que pueden propiciar estas tormentas.

En imágenes de reflectividad, se pueden identificar el mesociclón de este tipo de tormentas por un eco en forma de “gancho” (figura 3). En esta “gancho” encierra una región donde el aire se eleva en la corriente ascendente en constante rotación [5].

Dado el nivel de cizalladura, es esperable que estas tormentas tengan los fenómenos atmosféricos más violentos, como tornados, ciclones, granizo grande, vientos intensos y lluvias muy fuertes.

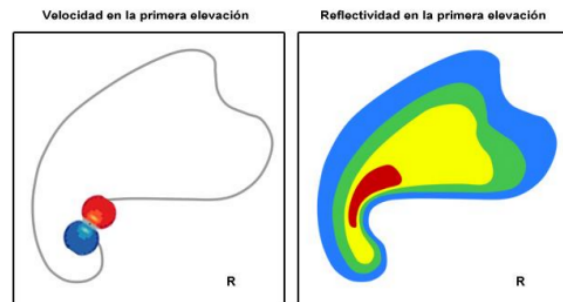


Figura 3: Reflexividad de gancho (Recuperado de blog.meteoclim.com)

2.2. Radar Doppler.

El radar Doppler funciona emitiendo a la atmósfera pulsos de energía electromagnética en el rango de frecuencias de las microondas. Cuando dichos pulsos inciden en un objeto, parte de esa energía electromagnética es devuelta hacia el radar. La energía devuelta al radar se analiza en sistemas informáticos para determinar la posición e intensidad de la precipitación y derivar información sobre la velocidad radial y la dirección del viento, valiéndose del efecto Doppler. Finalmente esta información se utiliza para generar imágenes como las que se analizaron para encontrar patrones en este trabajo. El radar Doppler realiza un barrido en la zona circundante a él, en este barrido el radar emite un pulso a cierto ángulo y una vez completada una revolución aumenta el ángulo de inclinación para volver a repetir el ciclo hasta tener un barrido que otorgue información útil sobre la atmósfera. [3]

2.2.1. Reflectividad.

La reflectividad es una medida de la capacidad de los blancos de interceptar y devolver la energía del radar, y depende de los parámetros físicos del objetos, como su tamaño, forma, orientación, composición, etc. La cantidad de energía devuelta al radar suele ser muchísimo menor que la del pulso de la transmisión original, el receptor del radar amplifica la señal devuelta y utiliza su amplitud para calcular el factor de reflectividad (Z).

El factor de reflectividad está dado por

$$Z = \sum_{i=1}^n D_i^6 \quad (1)$$

donde D_i es el diámetro de todos los blancos que dispersan la energía transmitida en la unidad de volumen muestreada.

2.2.2. Velocidad radial.

Debido a que el radar Doppler utiliza el efecto Doppler para la medición de los parámetros del volumen muestreado, entonces la velocidad que mide el radar es solo la velocidad que está en dirección paralela a la onda electromagnética que emite el radar, es decir, la velocidad radial del volumen muestreado. Esta medición nos proporciona información acerca de si el blanco se está acercando o alejando y con qué magnitud.

2.2.3. Interpretación de las imágenes del radar.

Dos de los principales tipos de imágenes que podemos obtener con el radar Doppler son las RHI, Range Height Indicator, y las PPI, Plan Position Indicator.

Las imágenes RHI se obtienen cuando se conserva constante el ángulo de azimut (que toma al Norte como 0° y al Sur como 180°) mientras que se varía el ángulo de elevación del radar para obtener una imagen de las tormentas en el plano vertical, como se muestra en la figura 1a.

En cambio, las imágenes PPI se producen al variar el ángulo de azimut, considerando un mismo ángulo de elevación del radar durante todo este proceso. Esto nos origina una imagen de las tormentas en el plano horizontal alrededor del radar (figura 1b).

Las imágenes con las que estaremos trabajando son del tipo PPI pero existen ciertas consideraciones que se deben tomar en cuenta.

3. Metodología

Consideramos las imágenes del radar Doppler, recaudados del Instituto de Astronomía y Meteorología (UdeG), de los meses de mayo a diciembre del año 2020. Mediante la aplicación Google Earth, se cargan las imágenes de tipo PPI donde se visualiza la intensidad de las tormentas, las cuales se caracterizan por sus patrones y su forma (figura 4). Estas imágenes PPI solo muestran la intensidad de las tormentas al nivel de la superficie, es decir, únicamente cuando existe precipitación, por lo que no obtenemos imágenes que nos muestren la tormenta completa como en la figura 1b. Por esto último, no es posible determinar el tipo de tormenta que se tiene (ordinaria, multicelular o supercelular), solo permitiéndonos caracterizar sus intensidades.

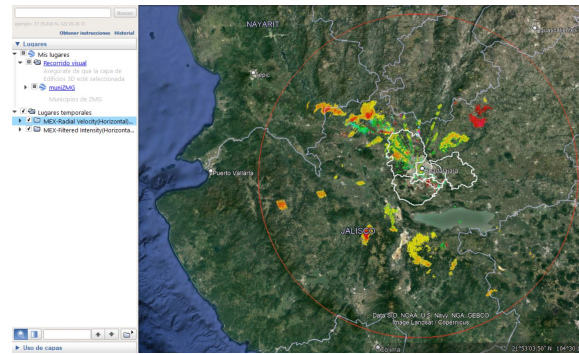


Figura 4: Imágenes de velocidad radial e intensidad del radar Doppler cargadas al programa de Google Earth Pro.

Para caracterizar la intensidad apropiada en cada imagen dada por el radar, utilizamos la escala presentada en la página del Radar Doppler UdeG [2], mostrada en la figura 5.

Los datos del radar proporcionan una imagen cada minuto transcurrido en el día. Estas imágenes nos permiten estudiar la evolución de las tormentas a lo largo del tiempo e identificar posibles patrones que estas puedan tener. El hecho de que tengamos los datos de los meses en los que ocurren mayor cantidad de lluvias nos permite, también, reconocer las diferencias que existen entre cada temporada.

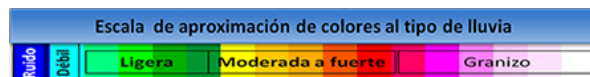


Figura 5: Escala proporcionada por la página del Radar Doppler UdeG.

Para estructurar el estudio de las tormentas, ela-

boramos una bitácora. Esta divide cada día por las secciones: “lluvia”, donde se anota si hubo lluvia ese día o no; “región”, donde se establece la zona donde se presentó la tormenta; “horario”, se anota las horas en que estuvo activa; “intensidad”, se menciona si la tormenta fue ligera, moderada, fuerte o si existió granizo; “observaciones”, aquí se deja libre espacio para hacer anotaciones pertinentes; y, por último, “imágenes”, donde se pueden mostrar capturas de las tormentas que se detallan. Si se presentan varias tormentas en un día, es posible repetir secciones para caracterizar cada una de ellas.

Conseguimos información adicional de las tormentas en los meses mencionados de la bitácora elaborada por la maestra Alma Delia Ortiz Bañuelos del año 2020. Además de periódicos locales para conocer las afectaciones producidas por las tormentas y la página de Twitter del Radar Doppler UDG, donde constantemente se reportan tormentas y pronósticos. Aparte de esto, nos ayudamos en la página llamada *Weather Spark* [7], que se basa en los datos climatológicos proporcionados por el Aeropuerto Internacional de Guadalajara, entendiendo que pueden estar sujetos a errores y usándolos más bien para entender el comportamiento de forma cualitativa.

Para la realización de las gráficas de precipitación durante los 3 cuatrimestres del año se tomaron los datos proporcionados por la tabla de lluvias del año 2020. Se hizo uso del programa Matlab, donde se cargaron los datos recaudados de los 3 trimestres del año 2020.

4. Resultados

4.1. Frecuencia de lluvias

Al tomar al año en 3 cuatrimestres y graficar la precipitación de cada día, podemos mostrar con más facilidad aquellos meses donde es más frecuente que se formen tormentas.

En el primer cuatrimestre (figura 6) vemos que, en general, no se presentan lluvias y aquellas que sí llegan a existir no tienen una intensidad muy grande.

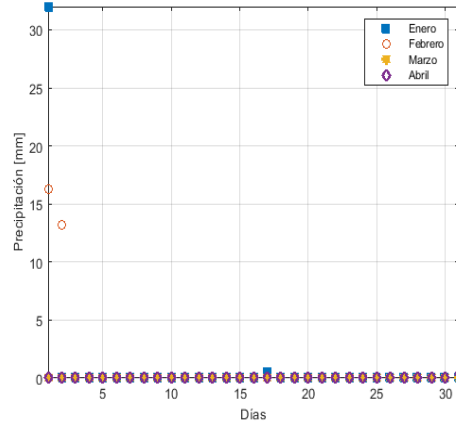


Figura 6: Primer cuatrimestre: precipitación contra días.

En la figura 7, correspondiente al segundo cuatrimestre, tenemos lluvias más frecuentes con intensidades más altas en comparación con los otros dos cuatrimestres. Si acaso, el mes de mayo presenta menos lluvias que los meses siguientes.

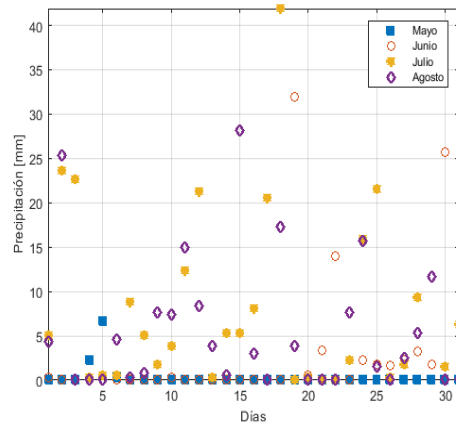


Figura 7: Segundo cuatrimestre: precipitación contra días.

Para el último cuatrimestre, figura 8, las lluvias son más comunes en el mes de septiembre y disminuyen su frecuencia drásticamente en los meses que le siguen, teniendo además menor intensidad.

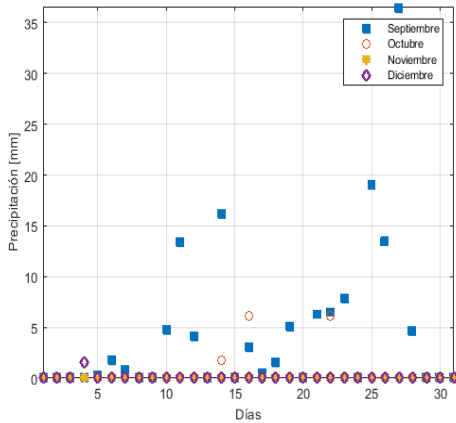


Figura 8: Tercer cuatrimestre: precipitación contra días.

Graficar las lluvias de esta forma, nos permite darnos una idea de que el periodo de lluvias más frecuentes durante el año se encuentre en el rango de meses entre junio y septiembre. Siendo los meses de Mayo y Octubre, meses de transición en esta temporada, con lluvias menos comunes y con menor intensidad.

4.2. Análisis cualitativo mensual

En esta sección presentamos el análisis de las tormentas que se presentaron en los meses de mayo a diciembre del año 2020. Considerando distintos factores que puedan influenciar su comportamiento o, incluso, hacer que las tormentas sigan ciertos patrones.

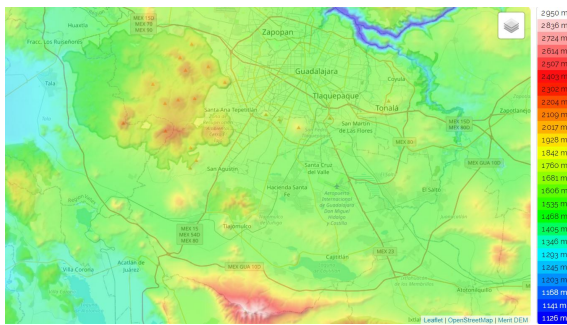


Figura 9: Mapa del relieve del Área Metropolitana de Guadalajara. Recuperado en Noviembre 2021 de: es-mx.topographic-map.com/maps/6c3h/Guadalajara/

Entre las cosas que podemos considerar como influyentes en el comportamiento de las tormentas está el relieve del AMG, figura 9, la humedad, figura 10, y la temperatura, figura 11.

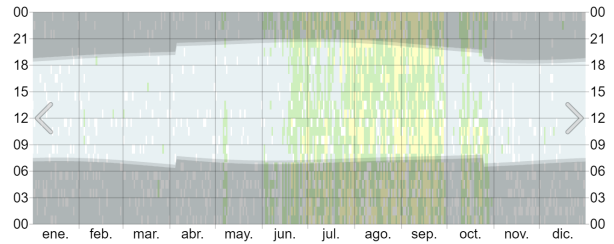


Figura 10: Gráfica de los niveles de humedad y de la duración del día en el 2020. Azul es *seco*, verde es *cómodo* y amarillo es *húmedo* [7].

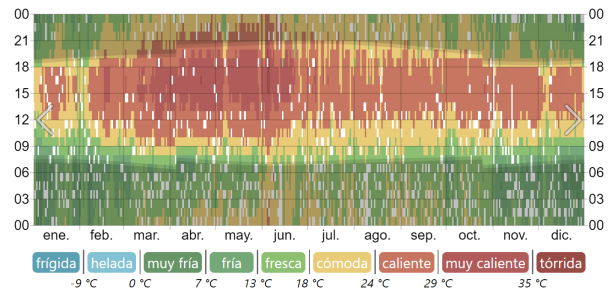


Figura 11: Gráfica de la temperatura en el día en el 2020 [7].

4.2.1. Abril

Para el mes de abril solo se observó una lluvia el día 30, esta lluvia es meramente anecdótica pues tuvo una intensidad ligera, a lo largo de la mañana y por la tarde temprana se observaron vientos con dirección noroeste. Los lugares donde ocurrió esta lluvia ligera fue en las zonas entre Guadalajara y Zapopan entre las 5 y 6 de la tarde. Se cree que pudo deberse al Frente frío 58 que refresco las zonas cercanas al golfo de México otra posible explicación puede deberse a que al ser temporada de calor, se evaporó la suficiente agua para generar un poco de precipitación en estas zonas.

4.2.2. Mayo

Mayo es el mes en que, a pesar de no estar dentro de la temporada de lluvias, existen varias tormentas aisladas. En el caso del año 2020, las tormentas que se produjeron en mayo estuvieron únicamente en los primeros 8 días.

Estas tormentas no pasaron de una intensidad fuerte, en las zonas pobladas, teniendo también 2 casos de granizadas aisladas en el bosque de la primavera y en Amatitlán. A pesar de las lluvias de intensidad fuerte, no existen indicios de que hayan

generado mayores afectaciones a la población de la AMG.

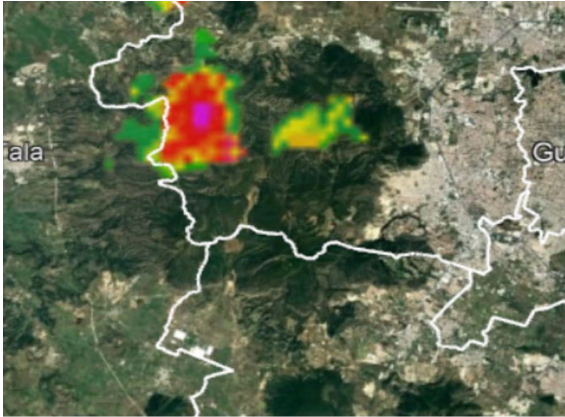


Figura 12: Ejemplo de lluvia intensa el 5 de mayo en el bosque de la primavera.

En muchas ocasiones, al menos durante este mes, la localización de las tormentas estuvo fuertemente ligada a factores como el relieve y la urbanización y los horarios. Por ejemplificar un caso de esto, en el municipio de Zapopan, muchas de las tormentas, incluyendo las de mayor intensidad, se produjeron en el bosque de la primera, una zona con bastante altitud en comparación con el resto del municipio y en la que no existe urbanización (figura 12).

Aparte de esto, las tormentas solo seguir un patrón en las horas en que se generaban y se disipaban. Muchos de los cúmulos se comenzaban a generar en horarios entre las 18:00 a las 22:00, generando tormentas moderadas y fuertes que se terminan disipando a primeras horas del siguiente día. Una vez disipadas, la mañana-tarde del día quedaba libre de estas tormentas.

En cuanto a la dirección de las tormentas, principalmente se mueven en dirección del suroeste, aunque en ocasiones, pueden venir desde dirección de la laguna de Chapala, es decir, hacia el norte. De entre todos los municipios que integran al AMG, aquellos donde se presentaron mayor cantidad de tormentas y con mayor intensidad fueron Zapopan, Tlajomulco y Zapotlanejo. Esto se le podría atribuir al relieve de la zona (figura 9). En Zapopan, el Bosque de la Primera actuaría como una barrera que impediría el paso de los cúmulos de nubes, además de disminuir el flujo de los vientos. En Tlajomulco, el Cerro Viejo, de gran altitud, actuaría de forma similar, impidiendo el flujo del viento y manteniendo a los cúmulos dentro del municipio (si vienen del noreste) o no permitiendo su paso (si vienen del sur).

4.2.3. Junio

Para el mes de junio no se tuvieron datos que se pudieran cargar en el Google Earth Pro, por lo que se tuvo que recurrir a la bitácora de la profesora (Alma D. Ortiz), al Twitter del radar Doppler de la UDG y a Weather Spark, una página que utiliza los datos meteorológicos proporcionados por el Aeropuerto Internacional de Guadalajara. Además de recopilar noticias de periódicos locales.

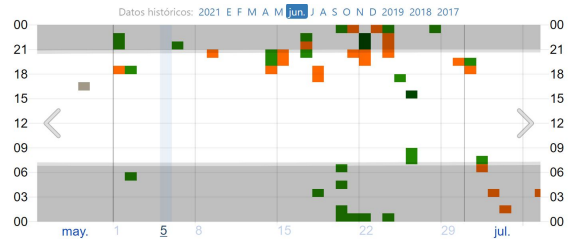


Figura 13: Diagrama de distribución de lluvias en el mes de junio por horas. Recuperado en Noviembre 2021 de: es.weatherspark.com/h/m/3866/2020/6/Tiempo-hist%C3%B3rico-en-junio-de-2020-en-Guadalajara-M%C3%A9xico#Figures-ObservedWeather

El mes de junio ya se considera dentro de la temporada de lluvias por lo que gran parte de los días existe al menos una tormenta de intensidad ligera. En este mes, existieron 2 días donde se presentó granizo, además de múltiples ocasiones donde hubo actividad eléctrica.

A pesar de no poder determinar el comportamiento de evolución de las tormentas, con ayuda de la página Weather Spark, podemos darnos una idea de los patrones de las tormentas según la hora del día. En la figura 13, se observa que las tormentas generalmente pudieron haber comenzado a formarse después de las 18:00, teniendo mayor intensidad en la madrugada y disipándose en las primeras horas de la mañana.

También conocemos, de distinta literatura, que, a pesar de ser temporada de huracanes, ninguna tormenta tropical o huracán tocó tierra o se acercó a las costas de Jalisco en junio, como para alterar las condiciones meteorológicas. Por lo que lo que vemos en este mes son tormentas que podemos esperar con normalidad en temporada de lluvias.

4.2.4. Julio

Julio es posiblemente uno de los meses del 2020 con mayor cantidad de lluvias en la ZMG, con solo un día sin lluvia, el 21 de julio. Esto se puede atribuir a la entrada de humedad del pacífico en esta

temporada en particular, además de que a partir de los últimos días de junio, comenzó la temporada de huracanes del 2020.

Algunos patrones en el comportamiento de las lluvias se conservan, en comparación con los meses anteriores. Por ejemplo, el municipio donde más llueve es Zapopan, seguido por Tlajomulco, siendo una las regiones con más lluvia (dentro de la ZMG) Ciudad Granja. Podemos atribuir esto a su cercanía con el bosque de la primavera.

Sin embargo, encontramos aquí un cambio importante en el patrón de movimiento de las tormentas. Mientras que en meses anteriores, el movimiento de las tormentas era en muchas ocasiones de este a oeste, en este caso, las tormentas también vienen del sur y del sureste, esto puede atribuirse a la humedad que vienen del Lago de Chapala en esta temporada. Otra cosa que podemos notar del mes de julio es que es más posible encontrar tormentas más largas, es decir, que cubran por completo todo el territorio de la ZMG.

Además de esto, en el mes de julio se nota una diferencia respecto a los horarios en los que se precipitan las tormentas. Recordando, en meses como mayo, estas se formaban durante las primeras horas de la noche, pero en julio, no era sino hasta las últimas horas, antes del amanecer, cuando comenzaba a llover, si es que seguía un patrón de tiempo que en ocasiones no era el caso. Esto, principalmente porque los días suelen ser más largos en julio (tiempo de luz solar) y, con esto, las horas en las que se reduce la temperatura disminuyen [7]. En Julio también es más probable encontrar tormentas fuertes o que presenten granizo. Estas tormentas tardan más en disiparse y suelen estar más presentes en el oeste de Zapopan, en el sur de Tlajomulco y, a veces, en el centro de Guadalajara, cerca de San Juan de Dios.

Las condiciones meteorológicas de inestabilidad de los huracanes pueden afectar el tiempo en la ZMG. Por ello, en el mes de julio existen unos cuantos casos donde podemos hablar de esto. Entre los días 6 a 12 de julio del 2020, se desarrolló la tormenta tropical Cristina [12] que, si bien no tocó tierra, produjo lluvias cerca de las costas del pacífico (figura 14). Precisamente en el día 12, dentro de la ZMG se reportaron intensas lluvias y fuertes vientos [9].

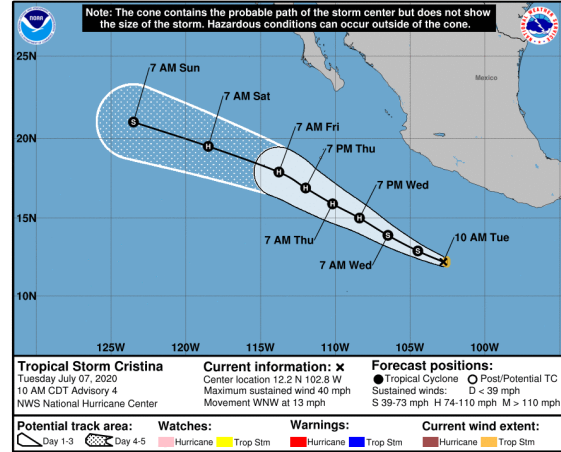


Figura 14: Trayectoria de la tormenta tropical Cristina, desde el 7 de julio hasta el 10 de julio. Recuperado de: foro.tiempo.com/tormenta-tropical-cristina-pacifico-oriental-t150439.0.html

A pesar de esta temporada de huracanes, existe el riesgo de tormentas intensas sin mayores influencias externas que pueden comprometer la infraestructura de la ZMG y la integridad de sus habitantes. Tal fue el caso de la tormenta del 15 de julio del 2020, con una fuerte intensidad y granizo, donde se reportaron inundaciones a lo largo de toda la ZMG, principalmente en Plaza del Sol, donde el agua sobrepasó los niveles de la banquetta y entró al estacionamiento de la plaza, dejando atrapados varios coches (figura 15).

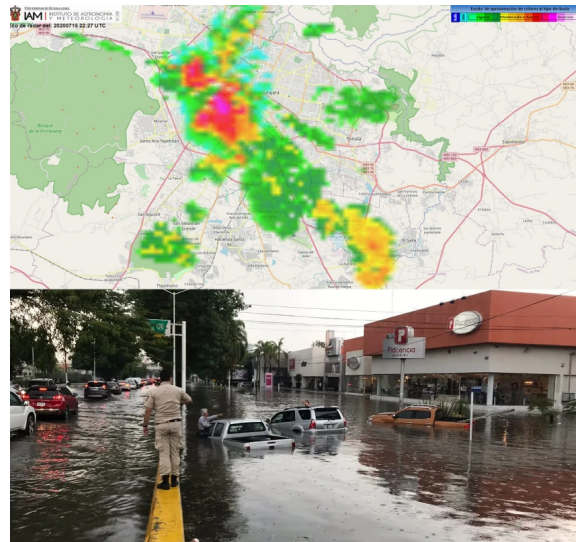
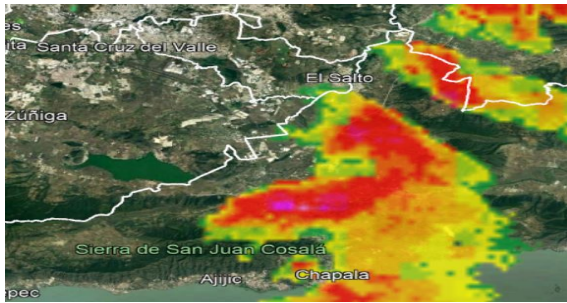


Figura 15: Imagen del Radar Doppler UdeG [2] y las afectaciones de la tormenta [10].

Otro evento resaltable sucedió el 18 de julio, cuando se avistó lo que, en un principio, se creyó un tornado pero que después fue catalogado por las autoridades como tromba, aunque en realidad se trata de una nube embudo, que fue avistado en el municipio de El Salto [11]. En las imágenes captadas por el radar, podemos notar una ligera rotación cerca de El Salto, formándose un gancho que se disipó cerca de 20 a 30 minutos después (figura 16a).



(a) Imágenes del radar.



(b) Fotografías.

Figura 16: Imagen del Radar Doppler UdeG [2] del gancho formado en la tormenta y fotografías de la nube embudo [11].

4.2.5. Agosto

Para el mes de agosto se contó con 30 de sus 31 días con lluvias. La información sobre el recuento de lluvias se obtuvo de la bitácora de la maestra, el Twitter del RadarDopplerUdG, y de la interpretación de las archivos kml.

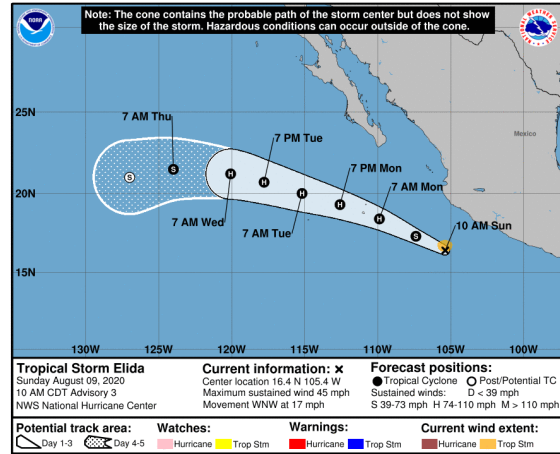


Figura 17: Tormenta Tropical Elida recuperada de la cuenta de twitter del RadarDopplerUdG

Para los primeros 10 días del mes de agosto se contó con una cantidad importante de granizadas ocurriendo principalmente en los municipios de Tlajomulco y Zapopan, seguidos por Guadalajara y Tlaquepaque con menor frecuencia. Las lluvias en general fueron de intensidades fuertes teniendo un origen con mayor frecuencia en las cercanías del lago de Chapala y desplazándose en dirección noroeste al bosque de la primavera, teniendo una frecuencia horario de ocurrencia entre la tarde-noche. Se atribuyen gran parte de estas lluvias a la tormenta tropical elida.

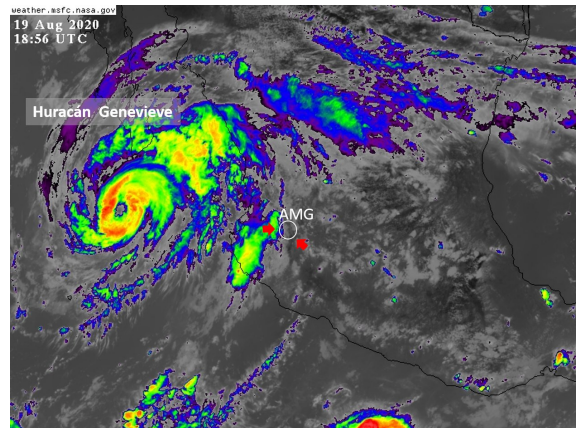


Figura 18: Huracan Genievia recuperado de la cuenta de Twitter del RadarDopplerUdG

En cuanto a los días del 11 al 20 de agosto se presentaron lluvias igualmente de intensidad fuerte mayormente con granizo producto de la tormenta tropical Genievia que evoluciono a un huracán. La mayor parte de las tormentas ocurrieron en Za-

popan, Tlaquepaque y Tlajomulco nuevamente con una dirección predominantemente hacia el oeste (en dirección al bosque de la primavera). Se observó que el horario con mayor frecuencia de las lluvias ocurría durante la tarde-noche incluso extendiéndose en algunas ocasiones hasta la madrugada del día siguiente sin disminuir apenas su intensidad.



Figura 19: Granizada ocurrida en Zapopan el día 16 de agosto con una capa de hielo de aproximadamente 30 cm. Recuperado en Noviembre 2021 de: www.eloccidental.com.mx/policiaca/noticias-granizada-en-el-area-metropolitana-5631615.html

Para el día 16 de agosto debido al Huracán Genieve, se registraron granizadas en zapopan que cubrieron de hielo varias de sus calles, esta granizada también ocurrió en Guadalajara en sus límites con Zapopan pero con menos presencia de daños.

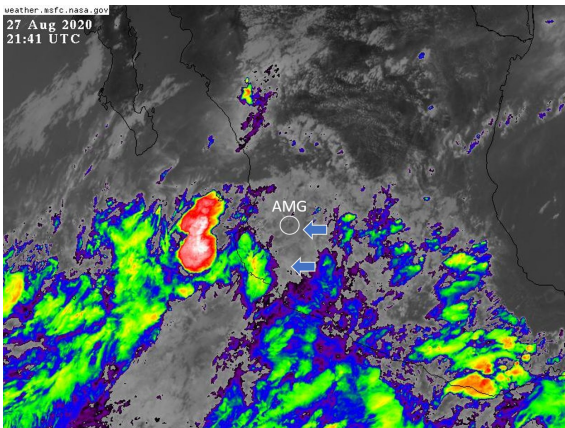


Figura 20: Tormenta Tropical Hernan, recuperado de la cuenta de Twitter del RadadDopplerUdG

Finalmente para los últimos días del mes de agosto, los días del 21 al 31 se tuvieron lluvias con una intensidad entre moderada y fuerte, siendo nuevamente el foco de frecuencias de estas lluvias el municipio de Zapopan y Tlajomulco, así como el sur

de Tlaquepaque. Esta vez se observaron distintas direcciones de desplazamiento pero que en general se dirigen al oeste, siendo las direcciones con mas frecuencia el noroeste y suroeste. El horario en que mas se presentaron las lluvias fueron por la tarde entre las 4:00 pm y las 10:00 pm. Se atribuyen parte de estas tormentas a la tormenta tropical Hernan. Se destaca ala apreciación de movimiento rotacional en una nube el día 22, esta ocurrió a alrededor de las 6:00 - 6:30, comenzo su desplazamiento desde Tlajomulco y fue desplazandose en dirección al aeropuerto de Guadalajara.

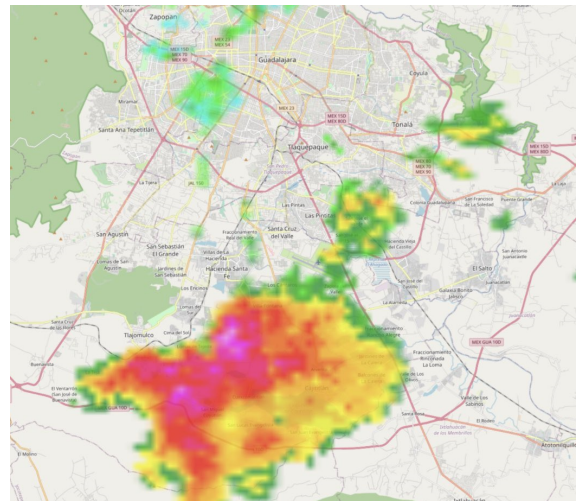


Figura 21: Tormenta con movimiento rotacional vista el 22 de agosto(recuperado de la cuenta de Twitter del RadadDopplerUdG).

No se reportaron daños considerables en los municipios afectados debido a la entrada de nubosidad.

4.2.6. Septiembre

En el mes de septiembre llovió 28 de los 30 días, de los cuales se presento granizo en 15 días y lluvia únicamente débil en 3. El 27 de septiembre fue uno de los días de mayor acumulado del 2020 con 36.3 MM, este día llovió entre 00:00-03:00 y 23:10-23:59; en la mañana hubo una tormenta multicelular y en la noche 3 tormentas distintas, 2 en Zapopan y una en Guadalajara que se juntaron, este día hubo caída de granizo.

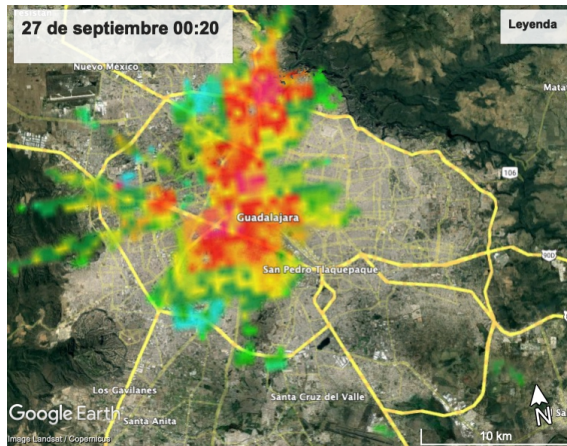


Figura 22: Imagen del Radar Doppler del 27 de septiembre.

En los primeros 5 días la mayoría de las lluvias fueron débiles, sin embargo hubo 6 lluvias fuertes las cuales se llevan a cabo el día 1ro; las lluvias se presentaron casi exclusivamente en Zapopan, Guadalajara y Tlaquepaque por igual. De los días 6 al 10 la densidad de lluvias fue aproximadamente el doble, con un aumento en las lluvias fuertes y moderadas; estas fueron principalmente en Los tres municipios mencionados anteriormente y empezaron las lluvias en el resto de municipios de la ZMG. De los días 11 al 15 la cantidad de lluvias aumento mínimo al doble, con un aumento de lluvias fuertes, comenzó a caer granizo; Las lluvias fueron principalmente en los mismos municipios. Del 16 al 20 se mantuvo aproximadamente la cantidad de lluvias. Del 20 al 25 disminuyeron las lluvias moderadas-fuertes. En los últimos 3 días hubo tormentas fuertes en cantidades similares en los municipios de Zapopa, Guadalajara, Tlaquepaque y Tlajomulco, estas se llevaron a cabo alrededor de media noche; no llovió los últimos 2 días.

Anteriormente se considero la cantidad de lluvias, pero no su extensión; Por extensión los municipios en lo que mas llovió fueron Zapopan principalmente, seguido por Tlaquepaque.

La mayoría de las lluvias tuvo lugar entre las 00:00-11:00 y 20:00-23:59. Hubo algunos días en que llovió en la tarde, especialmente el 17 llovió casi todo el día, con distintas tormentas unicelulares, esto puede deberse al paso de la tormenta tropical Karina.

4.2.7. Octubre

Para los primeros días del mes de octubre no se contaban con datos para cargar en Google Earth por lo que se recurrió a buscar información de estos

días en otras fuentes como twitter, la bitácora de la maestra y Weather Spark.

De estas paginas se encontró que durante la primera quincena de octubre las lluvias fueron en su mayoría de una intensidad moderada a fuerte, ocurriendo con mayor frecuencia en Zapopan, Guadalajara y Tlajomulco y con una frecuencia mas moderada en Tlaquepaque, cabe resaltar la poca presencia de lluvias en el área de Tonalá, esto podría deberse a una protección otorgada por el cerro de la reina y en general a que Tonalá se encuentra en una zona en promedio mas alta que los demás municipios de la zona metropolitana. Generalmente no se encontró algún patrón en la dirección del viento para esta quincena, pero se encontró que durante los días 15 y 16 estuvo pasando la onda tropical No.39, la cual recorre el occidente del país y a su vez interacciona con la entrada de humedad del océano pacifico. Los horarios en que solían ocurrir las lluvias fueron durante la tarde entre las 5 y las 7.

Para la segunda quincena del mes se tuvieron solo 2 días con lluvia (22 y 23 de octubre), el día 22 se tuvo una lluvia durante todo el día con una dirección generalmente al noroeste (del lago de Chapala en dirección al bosque de la primavera), la lluvia se observo principalmente en las zonas de Tlaquepaque, Zapopan y Guadalajara con una intensidad moderada a fuerte. Por otro lado, el día 23 se tuvieron lluvias durante entre las 12:00 - 20:00 con una intensidad mayoritariamente fuerte en toda la zona metropolitana. Se observo que aunque la intensidad en las zonas de Zapopan, Guadalajara y Tlaquepaque variaba mucho entre ligera y fuerte, en la zona de Tlajomulco se observaba mayoritariamente moderada a fuerte y con mayor frecuencia.

Se puede destacar la presencia de dos días con granizadas ambas ocurriendo en el municipio de Tlajomulco y solo una en toda la ZMG, pero estas no causaron daños aparentes en las zonas.

4.2.8. Noviembre

Durante este mes no se presentó lluvia dentro del Área Metropolitana de Guadalajara en ninguno de sus 30 días, esto se puede verificar con la información proporcionada por las páginas oficiales de Facebook y Twitter del Radar Doppler de la Universidad de Guadalajara (Radar Doppler UdG), así como en otras páginas de internet que también proporcionan información sobre las condiciones climáticas.

4.2.9. Diciembre

Las lluvias regresaron a la Zona Metropolitana de Guadalajara el día 3 de diciembre por la tarde siendo ligera a fuerte en Zapopan con rachas máximas que superaron los 40km/h en Las Cañadas y Montichelo, continuando con lluvias de ligera a moderadas en los siguientes días, hasta el 8 de diciembre, producidas por una entrada de humedad del pacífico [6]. Siendo el intervalo entre estos dos días los que presentaron un estado mayormente nublado para luego estar despejado el resto del mes con presencia de neblina únicamente los días 6, 10 y 31.

Diciembre, en comparación de años pasados, muestra un comportamiento similar de baja actividad en tormentas o lluvias como se observa ya desde inicio de la segunda mitad de noviembre, donde las tormentas son mínimas, habiendo un par de precipitaciones con lluvias moderada-fuerte relacionadas a una posible combinación de la temperatura invernal con condiciones anormales para la temporada [7].

Los vientos máximos que se registraron en Cañadas y Montichelo pueden relacionarse a que, estos, son espacios bastante externos de la mancha urbana que, además, presentan planicies extensas y, a su vez, son cercanos a una región boscosa, a pesar de que ambos sitios se encuentre exactamente al lado contrario de la ciudad en sentido norte-sur.

5. Discusiones y conclusiones

Las tormentas en la Zona Metropolitana de Guadalajara son fenómenos que están sujetos a múltiples factores que están en constante cambio a lo largo del año. En este documento presentamos las tormentas que ocurrieron durante todo el año 2020 en la ZMG.

Antes de hablar del comportamiento de las tormentas a lo largo del año, es necesario hablar sobre ciertos factores que se pueden considerar propios de la ZMG. Entre estos factores, podemos hablar del relieve (figura 9). Este no cambia y puede tener gran influencia en la velocidad del viento.

Durante los primeros meses del año, los niveles de humedad fueron muy bajos, caracterizando los meses desde enero hasta marzo por ser muy secos. En el mes de abril, se pueden encontrar momentos de gran humedad y, en mayo, la situación se vuelve diferente, a partir de mediados de este mes, los niveles de humedad incrementan a los valores que normalmente tendrán durante toda la temporada de lluvias, regresando a meses secos a partir de finales de septiembre, dejando a octubre con solo algunos

momentos de gran humedad. Tanto noviembre como diciembre, se mostraron como meses con poca humedad [7].

Analizando el panorama general, podemos decir que las lluvias más significativas en la ZMG comenzaron a finales de mayo y terminó a mediados de octubre. Dentro de estos tiempos, la mayoría de las tormentas se movía en dirección noroeste, viniendo comúnmente del sureste. Regiones como el Bosque de la Primavera (en Zapopan) y el Cerro Viejo (en Tlajomulco) eran propensas a tener muchas tormentas con intensidades elevadas. Por esto mismo, no es sorpresa que los municipios en que encontramos una mayor cantidad de precipitaciones eran Zapopan y Tlajomulco, más precisamente, el oeste y el sur de estos, respectivamente, zonas cercanas a estos lugares.

Otra característica compartida por varias tormentas a lo largo de todo el año fue el horario. La mayoría de las precipitaciones se producían después de la tarde-noche, sin importar el mes. Durante el mes de julio, este horario se atrasaba hasta cerca de la madrugada, esto probablemente porque en este mes los días (las horas con luz solar) son más largos.

Debido al fenómeno de conurbación en la ZMG, existen varios lugares en los alrededores con bastante vegetación y zonas boscosas. En varias ocasiones, se notaba también que estos lugares suelen atraer varias precipitaciones. Como ejemplo de esto, tenemos el Bosque de la Primavera, donde se produjeron varias granizadas y tormentas fuertes que jamás llegaron a las zonas urbanas.

De entre todas estas tormentas del año 2020, podemos mencionar algunas de las más resaltables. El 15 de julio ocurrió una tormenta lo suficientemente fuerte en los límites entre Zapopan y Guadalajara, en la zona donde se encuentra Plaza del Sol. Esta tormenta resaltó por los daños que causó, inundando López Mateos Sur y el estacionamiento de la plaza, interrumpiendo el tráfico y atrapando algunos coches [10]. El 18 de julio, en Parques del Castillo, en El Salto, se avistó una nube embudo que duró alrededor de 20 minutos. Su aparición no ocasionó más que el aviso de una intensa lluvia y un poco de granizo [11]. El 16 de agosto, una tormenta con bastante granizo azotó la colonia Santa Isabel en Zapopan, produciendo una capa de aproximadamente 30 cm de hielo, dificultando el paso de vehículos en la zona (figura 19).

Se puede destacar la presencia de 3 tormentas severas en el mes de agosto siendo éstas la tormenta tropical Elida, el Huracán Genieve y la tormen-

ta tropical Hernán. La tormenta tropical Elida vino acompañada de días muy lluviosos e intensos en la ZMG, pero sin dejar daños aparentes. Por su parte el Huracán Genenieve el cual tuvo su mayor impacto en la ZMG entre los días 14 a 17 de agosto dejó en la colonia Santa Isabel (Zapopan) y cercanías un acumulado de granizo de hasta 30 cm, durante el paso de este Huracán se tuvieron registros de 3 días consecutivos de granizadas y lluvias con intensidades fuertes. Cabría destacar la presencia de días con lluvias continuas en toda la ZMG. La tormenta tropical Hernán si bien no tuvo impactos significativos sobre la ZMG, se podría destacar que debido a esta tormenta se tuvo un acumulado histórico en Cautitlan Jalisco, donde dejó precipitaciones torrenciales, marejadas intensas y fuertes vientos que causaron daños catastróficos. pero sin producir daños en la ZMG. Se podría señalar el curioso detalle del

momento en que ocurrieron estas tormentas severas pues prácticamente siguió una detrás de la otra y siempre entre los días finales de cada decena, es decir, entre los días 7 - 10, 17 - 20 y 27 - 30 respectivamente. [13] La presencia de estos 3 huracanes provocó que en el mes de agosto se superase el acumulado de mm histórico según el IAM, se tuvo 174.8 mm de agua acumulados, y el histórico anterior era de 165.5 mm de agua. [14]

Como hemos visto en toda esta documentación de tormentas en la ZMG, estos fenómenos meteorológicos llegan a presentar patrones de comportamiento que, si bien, no podemos evitarlos por completo, su estudio, nos permite tomar precauciones y evitar daños a la infraestructura de la ciudad, además de prevenir las pérdidas materiales de los pobladores o incluso pérdida de vidas.

Apéndice A: Bitácora.

En este apéndice presentamos tablas para cada mes donde se presenta la información resumida de la bitácora que realizamos para el análisis de las tormentas. Dentro de cada tabla se incluyen únicamente los días donde hubo precipitación, agregando si existió granizo y la intensidad máxima que se presentó.

Mayo

Día	Lluvia	Intensidad máxima
1	Sí	Fuerte
2	Sí	Moderada
3	Sí	Moderada
4	Sí	Ligera
5	Granizo	Fuerte
6	Granizo	Fuerte
7	Sí	Fuerte
8	Sí	Fuerte
29	Sí	Moderada
30	Sí	Moderada

Cuadro 1: Bitácora de lluvias para el mes de Mayo.

Junio

Día	Lluvia	Intensidad máxima
1	Sí	Moderada
2	Sí	Moderada
6	Sí	Moderada
14	Sí	Fuerte
15	Sí	Fuerte
17	Sí	Fuerte
18	Granizo	Fuerte
19	Granizo	Fuerte
20	Sí	Moderada
21	Sí	Moderada
22	Sí	Fuerte
24	Sí	Moderada
25	Sí	Moderada
26	Sí	Fuerte
27	Sí	Moderada
28	Sí	Moderada
29	Sí	Moderada
30	Sí	Moderada

Cuadro 2: Bitácora de llluvias para el mes de Junio.

Julio

Día	Lluvia	Intensidad máxima
1	Granizo	Fuerte
2	Sí	Fuerte
3	Sí	Moderada
4	Sí	Leve
5	Sí	Leve
6	Sí	Leve
7	Sí	Moderada
8	Sí	Moderada
9	Sí	Moderada
10	Sí	Moderada
11	Sí	Fuerte
12	Sí	Fuerte
13	Sí	Leve
14	Sí	Moderada
15	Granizo	Fuerte
16	Sí	Moderada
17	Granizo	Fuerte
18	Granizo	Fuerte
19	Sí	Fuerte
20	Sí	Moderada
22	Sí	Fuerte
23	Sí	Moderada - Fuerte
24	Granizo	Moderada - Fuerte
25	Sí	Fuerte
26	Sí	Fuerte
27	Sí	Moderada
28	Sí	Leve
29	Granizo	Fuerte
30	Sí	Fuerte
31	Sí	Fuerte

Cuadro 3: Bitácora de lluvias para el mes de Julio.

Agosto

Día	Lluvia	Intensidad máxima
1	Sí	Fuerte
2	Granizo	Fuerte
3	Granizo	Fuerte
4	Granizo	Moderada
5	Sí	Moderada
6	Granizo	Fuerte
7	Sí	Fuerte
8	si	Fuerte
9	Sí	Moderada
10	Sí	Fuerte
11	Granizo	Moderada - Fuerte
12	Sí	Moderada
13	Sí	Moderada
14	Granizo	Moderada - Fuerte
15	Granizo	Moderada - Fuerte
16	Granizo	Moderada
17	Sí	Moderada
18	Sí	Ligera - Fuerte
19	Granizo	Fuerte
20	Sí	Moderada - Fuerte
21	Sí	Ligera
22	Granizo	Tormenta Severa
23	Granizo	Fuerte
24	Sí	Moderada - Fuerte
25	Sí	Ligera
26	Sí	Moderada - Fuerte
27	Sí	Moderada - Fuerte
28	Sí	Moderada
29	Sí	Fuerte
30	Granizo	Fuerte

Cuadro 4: Bitácora de lluvias para el mes de Agosto.

Septiembre

Día	Lluvia	Intensidad máxima
1	Sí	Fuerte
2	Sí	Ligera - Moderada
3	Sí	Débil
4	Sí	Débil - Ligera
5	Sí	Débil
6	Sí	Fuerte
7	Sí	Fuerte
8	Sí	Moderada - Fuerte
9	Sí	Moderada - Fuerte
10	Sí	Moderado - Fuerte
11	Granizo	Fuerte
12	Granizo	Fuerte
13	Granizo	Fuerte
14	Sí	Fuerte
15	Granizo	Fuerte
16	Granizo	Fuerte
17	Granizo	Fuerte
18	Granizo	Fuerte
19	Granizo	Fuerte
20	Sí	Moderado - Fuerte
21	Granizo	Fuerte
22	Granizo	Fuerte
23	Granizo	Fuerte
24	Sí	Débil
25	Granizo	Fuerte
26	Granizo	Fuerte
27	Granizo	Fuerte
28	Granizo	Fuerte

Cuadro 5: Bitácora de lluvias para el mes de Septiembre.

Octubre

Día	Lluvia	Intensidad máxima
11	Sí	Moderada
12	Sí	Moderada - Fuerte
14	Granizo	Fuerte
15	Sí	Fuerte
16	Sí	Ligera - Fuerte
22	Sí	Moderada - Fuerte
23	Granizo	Fuerte

Cuadro 6: Bitácora de lluvias para el mes de Octubre.

Noviembre

Durante este mes, no se registró ninguna lluvia en la ZMG.

Diciembre

Día	Lluvia	Intensidad
3	Sí	Moderada
4	Sí	Ligera - Moderada
5	Sí	Moderada - Fuerte
7	Sí	Moderada - Fuerte
8	Sí	Moderada

Cuadro 7: Bitácora de lluvias para el mes de diciembre.

Referencias

- [1] Área Metropolitana de Guadalajara. (s.f.). *Gobierno del Estado de Jalisco*. Jalisco, México. jalisco.gob.mx/es/jalisco/guadalajara
- [2] Datos del radar Doppler. (2020). *Instituto de Astronomía y Meteorología*. (UdeG). Guadalajara, México. iam.cucei.udg.mx/
- [3] COMET. (2012). “Fundamentos del Radar Meteorológico”. *The COMET Program*.
- [4] Juan Antonio Salado. (2020). “Las tormentas y su clasificación”. *Blog Meteoclim*. blog.meteoclim.com/las-tormentas-y-su-clasificacion
- [5] Pedro Gavidia. (2018). “Supercélula: definición y características básicas”. *Meteored: tiempo.com*. tiempo.com/noticias/divulgacion/supercelula-definicion-y-caracteristicas-basicas.html
- [6] Radar Doppler UdG. (2020). *Twitter*. México.
- [7] Weather Spark. *Cedar Lake Ventures, Inc.* Minnesota, Estados Unidos. es.weatherspark.com/
- [8] EAMET. “Frente de Racha”. *EAMET, Inc.* España. meteglosario.aemet.es
- [9] Jesús Alberto Oliva Díaz. “Se registra fuerte granizada y ráfagas de viento en Guadalajara, Jalisco”. (2020). *Noticieros Televisa*. México. noticieros.televisa.com/videos/se-registra-fuerte-granizada-y-rafagas-de-viento-en-guadalajara-jalisco/
- [10] Gabriela Espinosa. “¡Ah jijo! Fuerte lluvia y granizo inunda Zona Metropolitana de Guadalajara”. (2020). *Sopitas.com*. México. sopitas.com/noticias/guadalajara-lluvia-granizo-inundacion-zona-metropolitana-guadalajara-jalisco/
- [11] “Avistan “tornado” al oriente de la ZMG”. (2020). *Tráfico ZMG*. México. <https://traficozmg.com/2020/07/avistan-tornado-al-oriente-de-la-zmg/>
- [12] Información Histórica. (2020). *Gobierno de México*. México. smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica
- [13] El Occidental. (2020). “Hernán dejó incomunicadas a 30 delegaciones de la costa y daños en 630 casas”. *El Occidental*. Lugar México. eloccidental.com.mx/policiaca/noticias-desastre-natural-huracan-hernan-dejo-incomunicadas-a-30-delegaciones-de-la-costa-y-danos-en-630-casas-5692612.html
- [14] Omar García. (2020). “Comportamiento del temporal de lluvias 2020”. *IAM*. Lugar México. fb.watch/9sfq2V-3tD/