

**Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil**

**Mejoramiento de la capacidad de análisis del Programa de Cómputo
Pro-imgSAT para el Estudio de Imágenes Satelitales con fines de predicción
Hidrológica**

Trabajo de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Isaac Daniel Zamora Gallo

Director de Proyecto de Graduación:

Ing. Alberto Serrano Pacheco Ph.D.

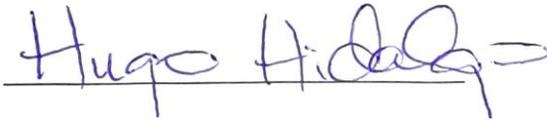
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio



Director del proyecto
Ing. Alberto Serrano Pacheco, Ph.D.



Asesor
Ing. Gravin Mayorga Jiménez, M.Sc.



Asesor
Ing. Hugo Hidalgo León, Ph.D.



Isaac Daniel Zamora Gallo

Fecha: 2021, Julio, 16

El suscrito, Isaac Daniel Zamora Gallo, cédula 1-1598-0345, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B37715**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Mejoramiento de la capacidad de análisis del Programa de Cómputo Pro-ImgSAT para el estudio de imágenes satelitales con fines de predicción hidrológica**, bajo la Dirección del **Doctor Ingeniero Alberto Serrano Pacheco**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mis padres, Milton Zamora y Jacqueline Gallo, que han hecho un gran esfuerzo para permitirme estudiar y lograr mis metas. Por brindarme su amor y apoyo incondicional.

También, a mi esposa Fernanda Cruz por haberme acompañado durante todos estos años; desde el momento en que comencé esta carrera y que aún hoy me impulsa a superarme y ser mejor en cada aspecto de mi vida.

Agradecimientos

A Dios primero por haberme permitido llegar tan lejos y poder concluir con esta etapa tan importante de mi vida.

A mis hermanos, Karen y Elías, que me han dado su cariño y me han apoyado durante todo este tiempo. Porque son mis hermanos, pero también mis amigos, y porque me han dado muchos tiempos alegres.

Un agradecimiento muy especial para mis suegros Andrés Cruz y Celia Siles que han sido como padres para mí y me han apoyado aún más allá de lo que debían. Porque me acogieron como uno más de ellos y me han apoyado en muchas formas y de forma desinteresada.

Zamora Gallo, Isaac Daniel

Mejoramiento de la capacidad de análisis del Programa de Cómputo Pro-imgSAT para el Estudio de Imágenes Satelitales con fines de predicción Hidrológica

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José. C.R.:

I. Zamora G., 2021

vi, 85, [5]h; ils. col. – número de refs. 50

Resumen

El trabajo busca mejorar la apariencia del programa y la corrección de errores en el código. Adicionalmente, revisar y mejorar las técnicas de estimación de precipitación. Finalmente, se pretende mejorar las distribuciones de Valores Extremos Generalizados (GEV) y Gumbel e incorporar las distribuciones Exponencial, Logística Generalizada y Generalizada de Pareto al programa.

Para la generación de estos cambios al programa se usó el ambiente de programación Visual Studio 2017 y se utilizaron las imágenes infrarrojas del satélite GOES-14 para los análisis correspondientes.

Con la realización del proyecto se corrigieron fallas que presentaba el programa Pro-imgSAT que dificultaban su uso. Adicionalmente, se analizaron 4 imágenes para cálculo de precipitación para distintos días y se realizaron mapas de probabilidad para cada una de las distribuciones. De estos resultados, se pudo observar una mejora en la apariencia y funcionalidad del programa. Por otro lado, los mapas a color en los análisis probabilísticos permiten comparar los resultados más fácilmente. Además, se recomienda realizar un análisis de las distribuciones GEV y Exponencial para determinar los casos de aplicabilidad. Además, para menores probabilidades, los mapas generados tienden a predecir menor precipitación respecto a las distribuciones programadas. Las distribuciones Gumbel y Logística son las que presentan una disminución del valor de precipitación más sutil, al disminuir la probabilidad, y compararlas con las demás distribuciones programadas. Por su parte, la técnica autoestimador necesita ser calibrada para el territorio nacional. Finalmente, se recomienda analizar la incorporación de nuevos parámetros a los cálculos para mejorar la exactitud de estos. I.D.Z.G.

CONCEPTOS CLAVES: ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA, NUBES, SATÉLITES, IMÁGENES SATELITALES INFRARROJAS, ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.

Tabla de contenidos

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Justificación	1
1.1.1	Problema Específico.....	1
1.1.2	Importancia	2
1.1.3	Antecedentes teóricos y prácticos	3
1.2	Objetivos.....	6
1.2.1	Objetivo General	6
1.2.2	Objetivos específicos	6
1.3	Delimitación del problema.....	6
1.3.1	Alcance	6
1.3.2	Geográfico o espacial.....	6
1.3.3	Temporales.....	7
1.3.4	Específicas.....	7
1.4	Limitaciones.....	8
2	Marco teórico	9
2.1	Nubes	9
2.1.1	Clasificación por nivel atmosférico de nubes	12
2.1.2	Géneros	14
2.1.3	Especies	19
2.1.4	Variedades.....	22
2.1.5	Características complementarias de las nubes.....	24
2.1.6	Nubes accesorio	26
2.1.7	Nubes especiales.....	27
2.2	Imágenes y satélites.....	28
2.2.1	Composición de la luz	28
2.2.2	Satélites	29
2.2.3	Estabilización de órbita satelital	31
2.2.4	Satélites meteorológicos	32
2.2.5	Imágenes satelitales.....	36
2.2.6	Transmisión y recepción de datos	39
2.2.7	Teledetección.....	40

2.2.8	Modelo Hidro-estimador	41
2.3	Estadística descriptiva y eventos extremos	43
2.3.1	Medidas de posición	45
2.3.2	Método de L-momentos	47
2.3.3	Distribución de Valor Extremo Generalizado (GEV)	49
2.3.4	Distribución Gumbell.....	52
2.3.5	Distribución Exponencial	53
2.3.6	Distribución Logística Generalizada	54
2.3.7	Distribución generalizada de Pareto	55
2.4	Métodos para estimación de precipitación.....	57
2.4.1	Técnica de NAW (Negri, Adler y Wetzel).....	57
2.4.2	Técnica de Autoestimador (Vicente, Scofield y Menzel).....	58
3	Descripción del programa y resultados.....	61
3.1	Descripción de las funcionalidades y mejoras del programa	61
3.2	Análisis estadístico de imágenes	67
3.3	Estimación de precipitación	73
4	Conclusiones y recomendaciones	75
4.1	Conclusiones.....	75
4.1.1	Desarrollo del programa.....	75
4.1.2	Análisis estadístico de imágenes	75
4.1.3	Estimación de precipitación	77
4.2	Recomendaciones	77
5	Fuentes bibliográficas.....	81
6	Apéndices	87
6.1	Instalador, código y manual de usuario Pro-imgSAT	87
6.2	Clasificación de nubes.....	88
6.3	Lista de satélites geoestacionarios	90
6.4	Página de internet del programa Pro-imgSAT.....	91

Tabla de figuras

Figura 1. Formación de nubes por efectos orográficos	10
Figura 2. Proceso de condensación de agua por efecto de frentes	11
Figura 3. Separación por nivel atmosférico de las nubes	13
Figura 4. Nube tipo Cirrus	14
Figura 5. Nubes tipo Cirrocumulus.....	15
Figura 6. Nubes tipo Cirrostratus.....	15
Figura 7. Nubes tipo Altocumulus.....	16
Figura 8. Nubes tipo Altostratus	16
Figura 9. Nubes tipo Nimbostratus	17
Figura 10. Nubes tipo Stratocumulus	17
Figura 11. Nubes tipo Stratus	18
Figura 12. Nubes tipo Cumulus	18
Figura 13. Nubes tipo Cumulonimbus	19
Figura 14. Espectro electromagnético	29
Figura 15. Posición de los satélites geoestacionarios activos.....	35
Figura 16. Bandas activas de ABI en el satélite GOES-16	36
Figura 17. Distribuciones Tipo I, II, III en el plano graficado de "x" contra la variable reducida "y"	51
Figura 18. Formas de la distribución Gamma	53
Figura 19. Ventana principal del programa Pro-imgSAT	62
Figura 20. Ventana para análisis estadístico	63
Figura 21. Ventana para estimación de precipitación	64
Figura 22. Ventana para comparado de imágenes.....	65
Figura 23. Ventana para cálculo de índice de destreza.....	66
Figura 24. Análisis probabilístico del 18/05/2012 para la distribución Generalizada de Valores Extremos en escala de grises para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4)	67
Figura 25. Análisis probabilístico 18/05/2012 para la distribución Generalizada de Valores Extremos con color para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4).....	68
Figura 26. Análisis probabilístico del 18/05/2012 para la distribución Gumbel en escala de grises para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4)	68

Figura 27. Análisis probabilístico del 18/05/2012 para la distribución Gumbel con color para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4).....	69
Figura 28. Análisis probabilístico del 18/05/2012 para la distribución Exponencial en escala de grises para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4).....	69
Figura 29. Análisis probabilístico del 18/05/2012 para la distribución Exponencial con color para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4).....	70
Figura 30. Análisis probabilístico del 18/05/2012 para la distribución Logística Generalizada en escala de grises para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4).....	70
Figura 31. Análisis probabilístico del 18/05/2012 para la distribución Logística Generalizada con color para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4)	71
Figura 32. Análisis probabilístico del 18/05/2012 para la distribución Generalizada de Pareto en escala de grises para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4).....	71
Figura 33. Análisis probabilístico del 18/05/2012 para la distribución Generalizada de Pareto con color para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4)	72
Figura 34. Comparativa de resultados de las imágenes generadas con diferentes porcentajes de probabilidad	72
Figura 35. Precipitación del 18/05/2012 a las 5:15 am, imagen original (1), técnica de Arkin (2), NAW (3) y autoestimador (4).....	73
Figura 36. Precipitación del 19/05/2012 a las 6:15 am, imagen original (1), técnica de Arkin (2), NAW (3) y autoestimador (4).....	73
Figura 37. Precipitación del 26/07/2012 a las 11:45 am, imagen original (1), técnica de Arkin (2), NAW (3) y autoestimador (4).....	74
Figura 38. Precipitación del 27/07/2012 a las 4:45 am, imagen original (1), técnica de Arkin (2), NAW (3) y autoestimador (4).....	74
Figura 39. Ventana principal de la página del programa.....	91
Figura 40. Página de información del programa	91
Figura 41. Página de ayuda y soporte.....	92
Figura 42. Página para descarga del programa	92

Tabla de cuadros

Cuadro 1. Alturas aproximadas por nivel y el género de nube que ocurre en cada nivel	13
Cuadro 2. Relaciones para conversión de componente de color rojo a temperatura	57
Cuadro 3. Resumen de técnica NAW.....	58
Cuadro 4. Resumen de clasificación de nubes.....	88
Cuadro 5. Lista de satélites meteorológicos geoestacionarios	90

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

1.1.1 Problema Específico

En Costa Rica el análisis meteorológico se dificulta debido a que a pesar de que se utilizan una serie de metodologías específicas, estas permiten modelar o estimar de manera aceptable el comportamiento de las precipitaciones sobre el país sólo para periodos de unos pocos días. Lo anterior se debe a que estas metodologías no son desarrolladas para el análisis en el territorio nacional, por lo tanto, la variación en la latitud resulta ser un factor que afecta directamente la precisión de los análisis meteorológicos (López, 2002). A pesar de esto, se utilizan modelos como el GFS (Global Forecast System desarrollado por el National Oceanic and Atmospheric Administration), el WS-ETA (Weather Service-ETA) y en ocasiones el ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast) de la Agencia Europea por parte el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) para poder realizar pronósticos de precipitaciones sobre el país debido a que no se cuenta con información o metodologías más precisas aplicables al territorio nacional.

Debido a la condición geográfica de Costa Rica, las condiciones de precipitaciones tienden a ser muy susceptibles a cambios repentinos. Adicionalmente, los ríos se ven afectados directamente por estos cambios, lo que produce que sean propensos a desbordamientos que provocan inundaciones y cierres de caminos. Esta problemática trae graves repercusiones para las personas y el país pues se pueden tener pérdidas materiales, económicas y humanas debido a que no se cuenta con la información suficiente para poder determinar los momentos en que se podrían generar situaciones de peligro.

En cuanto al análisis de datos existen varios inconvenientes entre los que destacan la necesidad de una cantidad considerable de información que debe estar debidamente ordenada y delimitada para poder ingresarla a los modelos numéricos; además, debido a que las condiciones meteorológicas son resultado de un gran número de variables físicas que pueden cambiar constantemente, el uso de equipos con gran poder de análisis es indispensable para poder realizar las predicciones y estudios meteorológicos (López, 2002).

Adicionalmente, a causa de la serie de inconvenientes que se presentan en la actualidad para el estudio de las masas de nubes y condiciones hidrológicas del país, es que el presente

proyecto busca mejorar el programa de cómputo PRO-imgSAT desarrollado por el ingeniero Karys Aguirre para su trabajo de graduación de Licenciatura en Ingeniería Civil del año 2012 “Desarrollo de un programa de cómputo para el análisis de imágenes de satélite con fines de predicción hidrológica” (Karys, 2012), en el cual se realiza un análisis de imágenes satelitales para la determinación de diversas características de importancia para análisis meteorológicos e hidrológicos. Se pretende agilizar la obtención de resultados que cuenten con una precisión al menos igual a la que se tiene en la actualidad enfocado para el territorio nacional.

Se busca que el programa sea capaz de determinar probabilidades de ocurrencia de un evento de precipitación determinado tomando como base las imágenes satelitales de las formaciones nubosas sobre el territorio costarricense. El programa en la actualidad cuenta con filtros para mejorar la apariencia de las imágenes; adicionalmente, cuenta con unos pocos métodos de análisis de probabilidades, pero es necesario optimizar y expandir esta parte del programa y es en la cual se va a dar mayor énfasis. Finalmente, con este proyecto, se busca establecer características para distintos eventos de modo que se pueda estudiar su posible impacto en las diferentes cuencas del país y así desarrollar metodologías adecuadas para el análisis hidrológico para el territorio nacional.

1.1.2 Importancia

El desarrollo de este proyecto busca crear herramientas que permitan realizar análisis y pronósticos eficientes en términos de rapidez y economía computacional. Esto permite que se pueda determinar una serie de características para diferentes zonas del país y poder correlacionar ciertos comportamientos que se dan en las cuencas hidrográficas con los análisis y resultados de precipitaciones obtenidos a partir del mejoramiento de imágenes satelitales por medio del programa Pro-imgSAT.

Un punto importante es que, en condiciones de un evento determinado, la obtención de información actualizada para mantener a la población informada puede marcar la diferencia para que los resultados ante dicho evento sean satisfactorios o trágicos. Además, la predicción de condiciones futuras puede ser determinante para tomar las medidas necesarias para mitigar los efectos negativos que estos eventos puedan ocasionar, y debido a que los métodos utilizados actualmente solo brindan una ventana de pocos días, esto puede significar que no se logre desarrollar las medidas preventivas necesarias en el tiempo necesario.

Por su parte la obtención de las probabilidades permite tomar consideraciones especiales para la prevención pues por medio de dichas probabilidades se pueden relacionar comportamientos de eventos actuales con eventos pasados que produjeron efectos tales como inundaciones, deslizamientos, entre otros. Por tal motivo, el proyecto busca beneficiar a la población del país brindándoles un medio de obtención de información rápida y confiable para que puedan tomar las medidas necesarias y determinar el orden de prioridad de atención de las comunidades.

1.1.3 Antecedentes teóricos y prácticos

Como primera aproximación el *Remote Sensing of Environment*, en el artículo "*Semi-automatic recognition and mapping of rainfall induced shallow landslides using optical satellite images*" (Reconocimiento y mapeo semiautomático de precipitaciones que inducen deslizamientos superficiales mediante imágenes ópticas de satélite; Mondini, 2010) exponen el método desarrollado y su calibración, utilizado para la detección de deslizamientos y erosión de diferentes lugares mediante el reconocimiento y mapeo de imágenes satelitales de eventos de precipitación. Para su estudio se utilizó el satélite QuickBird y la información obtenida del lugar. Al analizar la imagen por píxeles lograron encontrar una correlación entre ciertas precipitaciones y la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento.

Se puede observar que, para este artículo, la metodología utilizada es similar a la que se propone para el presente proyecto, en el cual se busca relacionar las imágenes satelitales con eventos específicos de precipitación. Adicionalmente, es rescatable que se utiliza la teledetección y modelos de elevación digital y topográficos. Se debe recalcar el hecho que a pesar de que se ven similitudes con el presente proyecto, el enfoque de aplicación difiere pues uno busca correlacionar precipitaciones con deslizamientos mientras que el otro busca medir precipitaciones y probabilidades de ocurrencia de eventos.

El International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation publicó el artículo titulado "*Estimation of spatial-temporal rainfall distribution using remote sensing techniques: A case study of Makanya catchment, Tanzania*" (Estimación de la distribución espacio-temporal de la precipitación utilizando técnicas de teledetección: Estudio del caso de la cuenca del Río Makanya, Tanzania; Kinoti, Zhongbo, Tsahaei & Ben, 2009) en el cual se abordan las complicaciones que existen actualmente para poder obtener datos que sean representativos de las cuencas hidrográficas. Además, expone que la utilización de métodos

físicos, como los que se utilizan tradicionalmente, producen problemas de estimación, especialmente cuando se cuenta con pocas estaciones medidoras. Se realizó una calibración del método por comparación con datos medidos. Los resultados muestran que funciona de manera confiable tanto para la localización espacial como para la distribución temporal de un área específica. Si bien se encuentran puntos de similitud, el trabajo busca solventar la falta de datos en el Río Makanya, lo que está totalmente desligado de los objetivos del presente proyecto.

Un artículo adicional con información relevante fue desarrollado por la Asociación Española de Teledetección (AET), titulado "Estimación de lluvias solo con imágenes infrarrojas. Comparativa entre versiones originales" (Tarruella & Jorge, 2001). La AET utiliza para su investigación únicamente imágenes infrarrojas y tres metodologías las cuales fueron desarrolladas por Arkin (1979), Negri et al (1984) y Vicente et al (1998); estas metodologías son Arkin, NAW y Autoestimador. Para el caso de las metodologías analizadas se obtuvo que estas deben ser recalibradas pues tienden a sobreestimar las precipitaciones y presentan comportamientos distintos de carácter espacial y estacional.

El artículo resulta ser un gran insumo para la investigación debido a que este se basa en el análisis de imágenes satelitales infrarrojas y son parte del proyecto para el proceso de estimación de precipitaciones. Se deben realizar calibraciones que cuenten con la capacidad de distinguir entre la locación y el periodo estacional para que se puedan aplicar de manera más adecuada al sistema de estimación de precipitaciones a nivel nacional.

Tratando de hacer un acercamiento a trabajos nacionales, se tiene el trabajo final de graduación "Caracterización del sistema nuboso de la cuenca del Río Turrialba mediante el uso de imágenes de satélite" (Anchía, 2001). En este trabajo se desarrollan análisis específicamente sobre la cuenca del Río Turrialba mediante el estudio de imágenes satelitales. Esta investigación es de suma importancia pues permite observar que la metodología aplicada al proyecto es posible desarrollarla a nivel nacional.

A pesar de la relación que se guarda con el trabajo de Anchía (2001), se pueden encontrar una serie de diferencias las cuales se resumen a continuación. La primera corresponde a que Anchía (2001) buscaba caracterizar las imágenes infrarrojas, mientras que el presente proyecto, adicionalmente, trata de identificar patrones que permitan calcular probabilidades de ocurrencia. Como segunda diferencia, se observa que el trabajo utilizó

únicamente imágenes de vapor de agua, las cuales se pueden obtener para la brecha del día en la que hay luz visible, pero las imágenes infrarrojas se pueden obtener las 24 horas del día.

Lenin Campozano, Daniela Ballari y Rolando Celleri, en su artículo "Imágenes TRMM para identificar patrones de precipitación e índices ENSO en Ecuador" hacen uso de las imágenes satelitales para analizar los patrones existentes entre las estaciones y el fenómeno ENOS (El Niño Oscilación del Sur) para desarrollar metodologías de alerta temprana en el Ecuador. Adicionalmente, se determinaron relaciones entre los efectos de temperatura superficial del Pacífico Tropical de la región Niño 1+2 y el Índice Trans Niño (Trenberth & Stepaniak, 2001). En este caso se utilizaron imágenes satelitales para determinar las relaciones existentes de los niveles de precipitación debidas a efectos relacionados a los índices ENSO.

Finalmente, en el trabajo final de graduación "Evaluación de imágenes satelitales de precipitaciones GPM (Global Precipitation Measurement) a escala mensual para el Azuay" (Benigno, 2016) aporta información sobre el uso de imágenes satelitales y sistemas de teledetección mediante el uso del método GPM IMERG 03 al comparar datos obtenidos con datos medidos en diferentes estaciones en Azuay. El estudio arrojó que el método permite obtener estimaciones adecuadas de precipitación a niveles mensuales. Se puede observar que este estudio es muy similar a lo propuesto para el presente proyecto; sin embargo, presenta una serie de diferencias. Primeramente, las estimaciones realizadas son para series mensuales, mientras que en el presente proyecto busca que los datos obtenidos sean mediciones en tiempo real. Como segundo punto, el método calibrado es para la zona de Azuay por lo que no es aplicable para nuestro país. Finalmente, se debe notar que un enfoque que posee el trabajo de Benigno (2016) busca poder llenar datos faltantes que no se pueden medir debido a la falta de equipo en las zonas cercanas a los Andes.

Si bien los trabajos antes mostrados son de gran importancia, aunque no resuelven el problema que se pretende tratar con el desarrollo de este proyecto, si brindan un gran panorama y un conjunto de información que es necesaria y determinante para la adecuada comprensión y desarrollo del proyecto. La utilización de información satelital presenta ventajas como la rápida obtención, procesamiento y cantidad de información disponible.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Expandir la capacidad de análisis del programa de cómputo Pro-imgSAT para análisis de imágenes satelitales con fines de predicción hidrológica y estudios de precipitación.

1.2.2 Objetivos específicos

- Optimizar el código y la presentación visual del programa Pro-imgSAT en pro de su funcionamiento y facilidad de uso.
- Incorporar métodos de análisis estadísticos y probabilísticos al programa PRO-imgSAT para análisis hidrológicos.
- Actualizar los métodos para estimación de precipitación basados en imágenes de satélite que posee el programa Pro-imgSAT para que se ajuste de mejor manera a los datos observados.

1.3 Delimitación del problema

1.3.1 Alcance

Parte importante del desarrollo de un programa es conocer el alcance que este posee y los límites de aplicabilidad, por lo que a continuación se presenta una delimitación del proyecto y las fronteras de aceptación de los resultados.

1.3.2 Geográfico o espacial

El alcance geográfico del proyecto busca que el programa sea capaz de caracterizar las imágenes satelitales tomadas sobre el territorio nacional mediante una calibración de los datos obtenidos con el propósito de realizar mediciones y estimaciones de carácter hidrológico. Adicionalmente, a causa de que el programa se basa en análisis de imágenes satelitales, se podría considerar la opción de calibrar el modelo para otras zonas geográficas si se considerara oportuno o necesario.

Un punto importante de considerar es que debido a que el programa se encarga de analizar imágenes de satélite de cualquier tamaño y calidad se debe tener cuidado con las imágenes que se escogen pues el programa se encarga de descomponer la imagen en píxeles, y es a partir de estos píxeles que se realizan los análisis de precipitaciones; por lo tanto, la calidad del análisis se puede ver afectada si se utilizan imágenes que no cumplan con la resolución adecuada. Por ejemplo, si se tienen dos satélites y el primero tiene una capacidad

de resolución de modo que el lado de cada pixel sea de 8 km y el segundo satélite posee una calidad de 2 km de lado por pixel; aunque las imágenes sean fotografías del mismo espacio geográfico, es de esperar que la imagen con resolución de 2 km dé resultados más representativos de la condición real.

1.3.3 Temporales

Debido al carácter del proyecto, este no posee limitaciones temporales. En cuanto al alcance temporal busca utilizar imágenes satelitales con resolución adecuada tomadas en diferentes momentos (días, meses, años) para poder realizar comparaciones entre imágenes y estimar probabilidades de ocurrencia de eventos con intensidades similares; es decir, a partir de imágenes de satélite que se posean de eventos anteriores, se puedan estimar características hidrológicas en el presente y futuro.

1.3.4 Específicas

Debido a que el proyecto se enfoca en generar un programa de cómputo que permita el análisis de imágenes satelitales para hacer estudios de precipitación e hidrológicos, un insumo de importancia sería poseer los datos de precipitación y caudal medidos para poder comparar los resultados generados por el programa. Así se podría calibrar el programa y determinar la calidad mínima de imagen que se pueda utilizar para obtener resultados representativos que permitan validar los métodos.

Por su parte, es importante considerar que prácticamente todos los equipos de cómputo modernos cuentan con la capacidad suficiente para realizar el mejoramiento y análisis de las imágenes. Se debe tener presente que conforme la calidad de la imagen sea mayor va a requerir más tiempo y capacidad de cómputo para realizar el procesamiento de la imagen.

Las imágenes de satélite están compuestas por diversos filtros para procesar las imágenes. Es de competencia para el proyecto el infrarrojo que es el utilizado por el programa. El principal problema de estas imágenes corresponde a que las imágenes infrarrojas capturan la temperatura de la parte superior de las nubes y es a partir de dicho criterio que se determinan las nubes con mayor capacidad de precipitación, pero hay nubes de poco espesor (que no son causantes de precipitaciones importantes) que se encuentran en alturas muy elevadas por lo que tienen bajas temperaturas en su parte superior, al igual que nubes de espesores considerables (generadoras de precipitación), por ejemplo una cumulonimbos posee temperaturas en la parte superior de alrededor de -25 a -30 °C (Martín, 1998).

Adicionalmente, como las imágenes satelitales solo se analizan para el área de Costa Rica, es necesario considerar que se podrían dejar por fuera eventos atmosféricos de importancia tales como huracanes o tormentas tropicales que pueden tener efectos considerables en las precipitaciones del país.

1.4 Limitaciones

La limitación más importante para el proyecto corresponde a que se cuenta únicamente con un registro pequeño de imágenes de satélite infrarrojas y estas no son específicas de Costa Rica, sino que son del área centroamericana. Además, estas no son correspondientes a eventos extremos. Las imágenes que se poseen corresponden a las obtenidas anteriormente por el Ing. Karus Aguirre, pero estas no se encuentran asociadas a eventos de precipitación específicos por lo que no se pueden comparar los resultados con datos medidos en tierra. Las imágenes satelitales que se tienen para el proyecto fueron obtenidas por el *GOES Project Science* (Geostationary Operational Environmental Satellite), tomadas por el satélite GOES-14.

Por otro lado, si se contara con una cantidad de imágenes infrarrojas con su caudal pico asociado para áreas determinadas, se podría obtener un análisis que permita determinar patrones de masas de nubes para caudales variables. Con esto se pueden realizar comparaciones individuales de imágenes de modo que se pueda generar una probabilidad de que determinada formación de nubes produzca una determinada precipitación con un caudal correspondiente.

2 Marco teórico

2.1 Nubes

Para poder entender de una forma correcta las nubes es necesario poder comprender de manera básica la modo de composición y el comportamiento que tienen. Esto permite tener un mayor entendimiento del modo en que los satélites captan las nubes. Es claro que las nubes están formadas por partículas pequeñas de agua o hielo que se encuentran suspendidas en el aire y que, además, puede variar de color dependiendo de las condiciones atmosféricas, luz existente, y núcleos de condensación (Alberola, 2013). Lo anterior afecta la forma en que estas pueden ser captadas por un satélite. Adicionalmente, el diámetro típico de las gotas de agua o cristales de hielo que forman las nubes es de 10 micras aproximadamente (Rogers, 2003).

Por su parte los procesos de formación de las nubes resultan ser muy complejos. Para que estas se puedan generar se necesitan condiciones específicas de presión, temperatura y humedad (Alberola, 2013). Cuando estas condiciones se reúnen, se generan los procesos que dan como resultado la formación de nubes, los cuales pueden ser por condensación del vapor de agua de la atmósfera o por sublimación de los cristales de hielo y condensación posterior del vapor producido (Rogers, 2003).

El proceso de convección sucede cuando el vapor de agua caliente sube al disminuir su densidad en comparación con sus alrededores. Este movimiento en las capas de la atmósfera genera que conforme la masa de vapor de agua caliente asciende, esta comience a reducir progresivamente la temperatura, lo cual lleva a la condensación del vapor. Una vez que sucede este proceso, el conglomerado de gotas de agua comienza a colisionar o unirse entre sí, lo que genera gotas de mayor tamaño que empiezan a descender progresivamente (Rogers, 2003).

El segundo proceso se da por un efecto de sublimación de cristales de hielo, por la interacción con vapor de agua. Como la presión disminuye con la altura, conforme el vapor de agua sube la capacidad de saturación del aire disminuye por lo que se produce la condensación del vapor. Al encontrarse el cristal de hielo rodeado por un gran número de gotas de agua se produce una reacción inestable debido a que la presión de vapor en la superficie del cristal de hielo es menor a la del agua por lo que el cristal de hielo se evapora lo que genera que las gotas a su alrededor se evaporen para poder compensar el equilibrio termodinámico. Este proceso lleva a que el cristal de hielo crezca, y una vez este posee un tamaño muy superior a

las gotas de agua comienza su descenso. En su recorrido, el cristal de hielo puede colisionar con otros cristales de hielo o gotas de agua. Si se da el primer caso se producen los copos de nieve, pero si se genera un choque con gotas de agua se produce el granizo. Conforme el cristal sigue descendiendo, las temperaturas comienzan a aumentar por lo que una vez que el cristal de hielo llega a la base de la nube comienza su proceso de fusión, aunque puede que no se llegue a fundir si la temperatura es lo bastante fría o el cristal es lo bastante grande (Rogers, 2003).

Por su parte, León y Quirantes (2004) explican que las nubes pueden generarse de tres maneras principales por medio del ascenso de masas de aire: orografía, frentes y convección.

Las nubes orográficas están relacionadas con el ascenso forzoso del vapor de agua a capas más elevadas y frías debido a la orografía. Cuando un cuerpo de vapor caliente se mueve a lo largo de una barrera natural, este cuerpo debe pasar por encima de esta barrera para poder cruzar. El lado de la barrera natural en la que se da este choque se conoce como barlovento y es la responsable de que el cuerpo caliente se mueva a zonas más altas y frías. Debido a que la saturación de aire se obtiene más rápido a temperaturas bajas, el vapor caliente pierde energía y se condensa produciendo los cuerpos nubosos. Este proceso generalmente produce que el otro lado de la barrera natural, conocido como sotavento, reciba vientos secos debido a que la mayoría de la humedad se queda en la parte del barlovento; sin embargo, igualmente puede suceder que la cantidad de humedad contenida sea alta y una parte logre cruzar al lado del sotavento. En la Figura 1 se aprecia el caso de la formación de nubes por efectos orográficos.

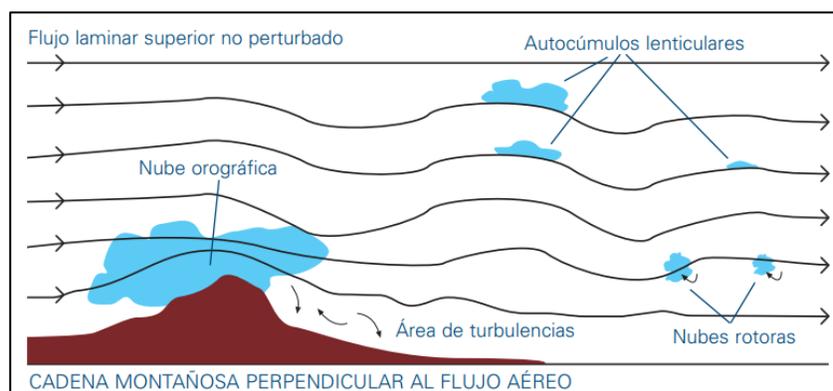


Figura 1. Formación de nubes por efectos orográficos
Fuente: León y Quirantes, 2004.

Las nubes frontales por su parte se dan por la presencia de frentes fríos o cálidos que al igual que las nubes orográficas son resultado del ascenso de capas cálidas a zonas más frías. La diferencia en este proceso recae en que el ascenso de las capas de aires cálidos, con altos niveles de humedad se pueden producir por efectos de frentes cálidos o frentes fríos. El caso de frentes cálidos sucede cuando una masa de aire frío se encuentra estática y una masa de aire caliente se mueve en dirección a este cuerpo de aire frío. Debido a que la densidad del cuerpo de aire caliente es menor a la densidad de la masa de aire frío, el cuerpo de aire frío funciona como una pared que hace que el cuerpo de aire caliente ascienda, lo que provoca que se condense a medida que aumenta su altura y disminuye su temperatura, a como se aprecia en la parte superior de la Figura 2. Por su parte, cuando una masa de aire caliente se encuentra estática y un cuerpo de aire frío se mueve en dirección a esta masa cálida, debido a las diferencias de densidades, la masa de aire caliente es levantada por la masa de aire frío, a como se puede apreciar en la parte inferior de la Figura 2, lo que conlleva a la condensación del agua contenida en la masa de aire caliente debido a la disminución de capacidad de saturación de las capas de aire conforme se aumenta la altura y se disminuye la temperatura.

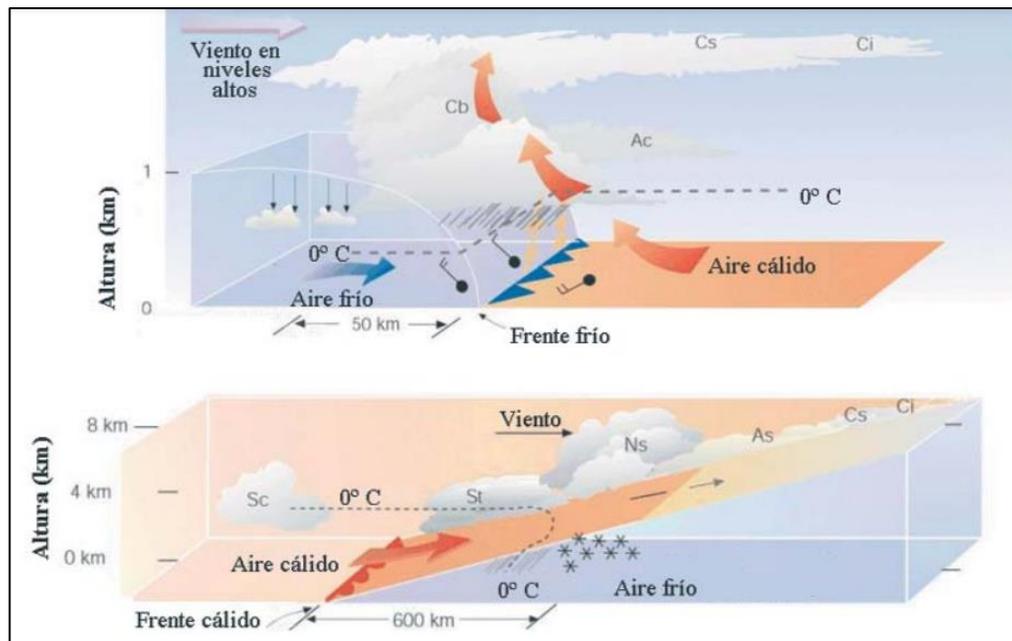


Figura 2. Proceso de condensación de agua por efecto de frentes
Fuente: León y Quirantes, 2004.

Finalmente, las nubes convectivas son resultado del movimiento de fluidos en dirección vertical, principalmente debido a diferencias en la temperatura y densidades. Debido a que la

temperatura del aire aumenta por el contacto con la superficie de la tierra y la radiación que libera, es de esperar que las capas inferiores se calienten más que las capas superiores de aire. Este desequilibrio provoca que las capas de aire se desplacen en dirección vertical, lo que permite que las capas frías descendan. La variación de la temperatura de masas de aire en dirección vertical se conoce como gradiente adiabático. Si la atmósfera no se encuentra saturada, la variación de la temperatura conforme se aumenta la altura se conoce como gradiente adiabático seco. Por efecto de la disminución de capacidad de saturación del aire a mayores alturas, a como se ha explicado en casos anteriores, el aire con agua en estado de vapor comienza a condensarse, lo que produce las nubes.

En cuanto a tipos de clasificación para las nubes, se tienen diferentes métodos para clasificarlas. Entre estos métodos se tiene la forma de estas, la movilidad, la naturaleza y el nivel que ocupan en la atmósfera (León y Quirantes, 2004). Para el caso del análisis que se pretende desarrollar, el factor más influyente corresponde a la altura que posee la nube debido a las variaciones de temperatura que posee el cambio de nivel atmosférico.

2.1.1 Clasificación por nivel atmosférico de nubes

León y Quirantes (2004) ofrecen una clasificación de las nubes de acuerdo con la posición que ocupan verticalmente en la tropósfera y se divide en tres niveles principales. Estos tres niveles dividen la tropósfera en una zona baja, otra zona intermedia y finalmente, una zona alta. La zona baja se tiene hasta alturas aproximadas de 2 a 3 km sobre el nivel de mar y estas nubes se denominan nubes bajas. Por su parte, la zona de nubes medias se encuentra en una franja de alturas que rondan desde los 3 km hasta los 7 km. En la zona de nubes altas, los límites van a partir de los 7 km de altura hasta incluso los 14 km de altura o más. Es muy importante notar que estas fronteras no se pueden considerar como algo exacto puesto que se tiene que tomar en consideración la latitud a la que se encuentren.

Adicionalmente, existen un grupo de nubes de alturas considerables que se pueden extender desde la zona de nubes bajas hasta la zona de nubes altas, las cuales se clasifican como nubes de desarrollo vertical.

Por su parte, el World Meteorological Organization (2017) complementa la información presentada por León y Quirantes (2004) y expone que los niveles para clasificación por altura se nombran de manera formal como "étages". A su vez, reafirman que los límites entre niveles

varían y están relacionados con la latitud en la que se encuentran. En el Cuadro 1 se puede observar la clasificación que realiza el World Meteorological Organization.

Cuadro 1. Alturas aproximadas por nivel y el género de nube que ocurre en cada nivel

Nivel	Género	Zona Polar	Zona Templada	Zona Tropical
Alto	Cirros Cirrocumulus Cirrostratos	3 – 8 km	5 – 13 km	6 – 18 km
Medio	Altostratus Altostratus Nimbostratus	2 – 4 km	2 – 7 km	2 – 8 km
Bajo	Stratus Stratocumulus Cumulus Cumulonimbus	De la superficie a los 2 km	De la superficie a los 2 km	De la superficie a los 2 km

Fuente: World Meteorological Organization, 2017.

Adicionalmente, explican que la mayoría de las nubes se mantienen dentro de su nivel, pero existen tres excepciones las cuales son: Altostratus (usualmente se encuentran en el nivel medio, pero pueden extenderse más arriba), Nimbostratus (usualmente se encuentra en el nivel medio, pero se puede extender en cualquiera de los otros dos niveles) y las Cumulus y Cumulonimbus (usualmente su parte baja está en el nivel bajo, pero es frecuente que se extiendan hasta el nivel medio y alto). En la Figura 3 se puede observar la separación por niveles que se utiliza en el Atlas Internacional de Nubes, en su última versión del 2017.

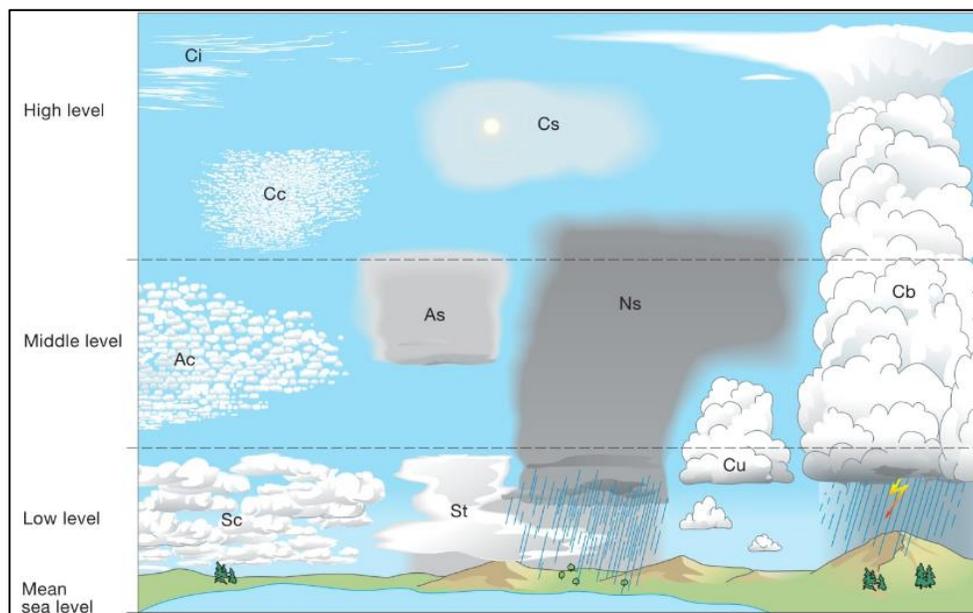


Figura 3. Separación por nivel atmosférico de las nubes
Fuente: World Meteorological Organization, 2017.

2.1.2 Géneros

Según León y Quirantes (2004), las nubes sufren procesos de evolución continua, por lo que las formas que pueden tomar son muy variadas. A pesar de esto, se ha logrado desarrollar una clasificación que permite agrupar a estas nubes en grupos llamados géneros, los cuales se dividen en diez tipos diferentes. Cada una de las clasificaciones por género resulta ser mutuamente excluyente, pero se tienen subdivisiones por especies y variedades que se explican más adelante. Adicionalmente el World Meteorological Organization (2017) expone que esta división en géneros no puede encasillar la totalidad de aspectos y posibilidades, puesto que se encuentra limitado por sus características esenciales para poder identificarlas. A continuación, se explican los géneros de nubes de acuerdo con el "International Cloud Atlas".

- Cirrus (Ci)

Estas nubes tienen una estructura separada con forma de hilos blancos y delicados; también pueden ser manchas blancas o mayormente blancas o bandas estrechas. Su apariencia tiende a ser como la de cabellos.



Figura 4. Nube tipo Cirrus
Fuente: World Meteorological Organization, 2017.

- Cirrocumulus (CC)

Hoja o capa delgada y blanca sin sombreado compuesta de partículas muy pequeñas con formas de granos. Estos pueden encontrarse mezclados o separados y colocados en una

forma medianamente regular. Los elementos que lo componen poseen un grosor aparente de menos de un grado.



Figura 5. Nubes tipo Cirrocumulus
Fuente: World Meteorological Organization, 2017.

- Cirrostratus (Cs)

Corresponde a aquellas nubes tipo velo de color blanquecino y transparente, de aspecto fibroso o liso que puede cubrir parcial o totalmente el cielo. Además, estas nubes comúnmente producen un efecto de halo debido a la difracción de la luz.



Figura 6. Nubes tipo Cirrostratus
Fuente: World Meteorological Organization, 2017.

- Altostratus (As)

Comúnmente corresponden a las nubes de color blanco o gris (o ambos), con forma de parche o capa, normalmente sombreada y compuesta por láminas, masas redondas, rollos entre otras. Estas pueden ser parcialmente fibrosas o difusas que pueden o no estar mezcladas entre sí. Su ancho aparente puede variar entre uno y cinco grados.



Figura 7. Nubes tipo Altostratus
Fuente: World Meteorological Organization, 2017.

- Altostratus (As)

Estas nubes normalmente tienen un color grisáceo o azulado con formas de capas estriadas, fibrosas o de apariencia uniforme. Pueden cubrir total o parcialmente el cielo y permiten que se filtre la luz solar al menos de manera parcial. Este tipo de nube no muestra el fenómeno de halo.



Figura 8. Nubes tipo Altostratus
Fuente: World Meteorological Organization, 2017.

- Nimbostratus (Ns)

Estas nubes corresponden a una capa grisácea y normalmente oscura. La apariencia se vuelve difusa debido a precipitación constante que comúnmente alcanza el suelo. Su espesor es lo suficientemente grueso para bloquear la luz solar. Pueden aparecer con frecuencia nubes bajas y desiguales bajo la capa nubosa con las cuales se pueden mezclar ocasionalmente.



Figura 9. Nubes tipo Nimbostratus
Fuente: World Meteorological Organization, 2017.

- Stratocumulus (Sc)

Estas nubes están compuestas por capas o parches blanquecinos o grises (o ambos), que contiene partes negras en la mayoría de las veces. Se encuentran compuestas por masas redondas, rollos, entre otras; que no son fibrosas y que podrían mezclarse entre sí. Regularmente los arreglos de nubes de este tipo pueden mostrar un ancho aparente mayor a cinco grados.



Figura 10. Nubes tipo Stratocumulus
Fuente: World Meteorological Organization, 2017.

- Stratus (St)

Comúnmente son cuerpos nubosos tipo capa de color gris con una base bastante uniforme. Generalmente generan llovizna o nieve o copos de nieve. Si el sol es visible a través de la nube, se puede observar su contorno claramente. Estas nubes no producen un efecto de halo, con excepción de que se tengan temperaturas muy bajas.



Figura 11. Nubes tipo Stratus
Fuente: World Meteorological Organization, 2017.

- Cumulus (Cu)

Corresponden a cuerpos nubosos separados y con contornos definidos. Su desarrollo se da principalmente de manera vertical en formas de montes, domos o torres; en su parte superior comúnmente muestran formas como de coliflor. Las partes que reciben sol son principalmente blancas mientras sus bases son relativamente oscuras y planas. Ocasionalmente, estas nubes pueden ser irregulares.



Figura 12. Nubes tipo Cumulus
Fuente: World Meteorological Organization, 2017.

- Cumulonimbus (Cb)

Nubes pesadas y densas, con una extensión vertical muy considerable. Sus formas pueden ser como una montaña o torres muy altas. La parte superior de estas nubes puede ser lisa, fibrosa o estriada y tiende a ser plana. Pueden extenderse con formas de yunque o penacho.

Al observar la nube en su parte inferior, que resulta ser muy oscura, se pueden observar nubes irregulares que pueden o no unirse con la Cumulonimbus. Adicionalmente, se puede generar precipitación tipo virga (masa de rayos de lluvia que aparentan estar guindando desde la nube y que se evaporan antes de alcanzar el suelo).



Figura 13. Nubes tipo Cumulonimbus
Fuente: World Meteorological Organization, 2017.

2.1.3 Especies

El World Meteorological Organization (2017) distingue un conjunto de especies excluyentes mutuamente por sus características. En total se distinguen un total de 15 especies las cuales se definen en el "International Cloud Atlas" actualizado en el 2017. Esta subdivisión se realiza debido que pueden existir una serie de variaciones en su forma o su estructura interna. Si bien estas especies son mutuamente excluyentes entre sí, estas pueden estar contenidas en diferentes géneros.

- Fibratus

Esta especie corresponde con nubes separadas o a un velo delgado que se encuentra constituido por filamentos principalmente rectos o ligeramente curvos que no terminan en ganchos o mechones. Se asocia principalmente a nubes del género Cirrus y Cirrustratus.

- Uncinus

Se encuentran en nubes del género Cirrus, pero no poseen partes grises. Comúnmente, con forma de coma y que terminan en gancho o mechones. Su parte superior no termina en una protuberancia redondeada.

- Spissatus

Nube del género Cirrus fraccionada en partes que poseen una densidad suficiente para que se vean grisáceas cuando se miran contra el sol; adicionalmente, pueden obstruir parcial o totalmente el sol o su contorno. Comúnmente se originan de las partes superiores de nubes tipo Cumulonimbus.

- Castellanus

Corresponden a las nubes que en alguna porción de su parte superior poseen protuberancias cumuliformes con formas de torres. Algunas de estas protuberancias resultan ser más altas que anchas y se encuentran interconectadas con una misma base; además, parecen estar acomodadas en líneas. Esta especie resulta mayormente visible cuando se observan desde un costado.

Se encuentran para las nubes del género Cirrus, Cirrocumulus, Altocumulus y Stratocumulus.

- Floccus

Esta especie se caracteriza porque cada nube tiene forma de penacho pequeño y cumuliforme. La parte inferior de estas nubes resulta tener forma irregular y se encuentran comúnmente acompañadas por precipitaciones con forma de rayos que se evaporan antes de llegar a la superficie.

Esta especie es común encontrarla en nubes de los géneros Cirrus, Cirrocumulus, Altocumulus y Stratocumulus.

- Stratiformis

Esta especie designa aquellas nubes que se extienden en hojas o capas muy extensas en posición horizontal. Se aplica para nubes de los géneros Altopumulus, Stratopumulus y, ocasionalmente, Cirropumulus.

- Nebulosus

Son nubes tipo nebulosas con formas de velo mal definidas o capas de nubes que no muestran diferencias aparentes. Se asignan a los géneros Cirrostratus y Stratus.

- Lenticularis

Corresponde a las nubes que tienen forma de lentes o almendras. Tienden a ser muy elongadas y con contornos muy definidos. Ocasionalmente pueden mostrar un efecto de iridiscencia. Se presentan con más frecuencia en nubes con origen orográfico, aunque no se limitan exclusivamente a estas nubes.

Esta especie se aplica principalmente a nubes de los géneros Cirropumulus, Altopumulus y Stratopumulus.

- Volutus

Corresponde a nubes comúnmente bajas, separadas, horizontales y con forma de tubo. Pueden tender a aparentar que se enrollan sobre un eje horizontal. Pueden presentar forma de agujero ondular.

Se aplican a los géneros Stratopumulus principalmente, aunque en ocasiones raras se puede aplicar a Altopumulus.

- Fractus

Nubes con formas de fragmentos irregulares y con formas igualmente irregulares. Se aplican a nubes de los géneros Stratus y Cumulus.

- Humilis

Estas nubes del género Cumulus se caracterizan por poseer una extensión vertical muy baja y comúnmente poseen forma aplanada.

- Mediocris

Pertenecen a las nubes del género Cumulus y están caracterizadas por extensiones verticales moderadas con pequeñas protuberancias en las partes superiores de la nube.

- Congestus

Estas nubes corresponden a Cumulus con protuberancias con extensiones verticales de gran altura y contornos fuertes. La parte superior de este tipo de nube generalmente recuerda la forma de una coliflor.

- Calvus

Nubes del género Cumulonimbus en la que algunas de las protuberancias de su parte superior comienzan a perder sus contornos característicos, pero no se distinguen partes cirriformes. Estas protuberancias que se desprenden tienden a formar una masa blanca.

- Capillatus

Cumulonimbus caracterizadas por la presencia, principalmente en su parte superior por estructuras cirriformes con apariencia fibrosa o estriada. Generalmente tienen formas de yunque, penacho. Generalmente están caracterizadas por lluvias o tormentas. Pueden estar acompañadas de granizo o borrascas.

2.1.4 Variedades

Las variedades se entienden como los arreglos macroscópicos de los elementos y el grado de transparencia del género. Bajo esta consideración, una misma nube puede contener más de una variedad, por lo que en este caso las variedades no son mutuamente excluyentes con excepción de las variedades translucidus y opacus. De igual manera, es de esperar que las variedades no pertenecen a un único género, sino que se pueden presentar en diversos géneros. Según World Meteorological Organization (2017), se tienen 9 tipos de variedades, las cuales se presentan a continuación.

- Intortus

Se encuentra en las nubes del género Cirrus en las cuales los filamentos son irregularmente curvos y comúnmente enredados entre ellos de manera errática y no predecible.

- Vertebratus

Esta variedad se asigna a aquellas nubes que, por su arreglo, dan la apariencia de una columna vertebral, costillas o un esqueleto de pescado. Esta variedad aplica principalmente para las nubes del género Cirrus.

- Undulatus

Corresponde a aquellas nubes que se forman en parches, hojas o capaz con formas onduladas. Estas ondulaciones se tienden a ver de manera ordenada en capaz y en nubes compuestas, que pueden estar mezcladas o separadas. Se pueden tener casos en los que se tienen sistemas ondulados dobles. Se puede aplicar principalmente a los géneros de nubes Cirrocumulus, Cirrostratus, Altocumulus, Altostratus, Stratocumulus y Stratus.

- Radiatus

Se encuentra en nubes con bandas anchas en posición paralela. Debido a un efecto de perspectiva, este tipo de nubes parecen converger en un mismo punto en el horizonte. Estos puntos se conocen como puntos de radiación. Se aplica para los géneros Cirrus, Altocumulus, Stratocumulus y Cumulus.

- Lacunosus

Las nubes con forma de capaz o parches, muy delgadas, con marcas aproximadamente regulares de huecos redondos. Comúnmente, poseen bodes decorados. Debido al acomodo de los elementos y los espacios vacíos, aparentan tener una forma de red o de panel. Se aplica para los géneros Cirrocumulus y Altocumulus; también se puede aplicar a Stratocumulus, pero es un caso muy extraño.

- Duplicatus

Corresponde a nubes con formas de parches o capaz que se acomodan en dos o más niveles, que pueden mezclarse parcialmente entre sí. Esta variedad se aplica a las nubes de los géneros Cirrus, Cirrostratus, Altocumulus y Stratocumulus.

- Translucidatus

Se aplica para aquellas nubes que se extienden en capas o parches muy extensos, en las cuales se puede determinar la posición del sol o la luna. Comúnmente se aplica a los géneros Altocumulus, Altostratus, Stratocumulus y Stratus.

- Perlucidus

Estas nubes se caracterizan por ser capas o parches de gran amplitud en las cuales se distinguen diferentes espacios entre los elementos (en ocasiones pueden ser muy pequeños). Estos espacios permiten que se vean el cielo azul, el sol, la luna o cualquier otra nube que se encuentra por encima de ella. Se pueden observar con las variedades translucidus y opacus. Por lo general se aplica a nubes de los géneros Altocumulus y Stratocumulus.

- Opacus

Se caracterizan por ser parches o capas extensas en las cuales la mayor parte de la nube es suficientemente opaca de modo que oculta completamente el sol o la luna. Se aplica a los géneros Altocumulus, Altostratus, Stratocumulus y Stratus.

2.1.5 Características complementarias de las nubes

Adicionalmente, el World Meteorological Organization expone que hay once características adicionales que pueden estar en la totalidad o parte de la nube, las cuales se explican a continuación.

- Incus

Esta característica suplementaria se aplica a la parte superior de las nubes del género Cumulonimbus debido a la forma de yunque que se genera con apariencia suave, fibrosa o estriada.

- Mamma

Corresponde a las nubes que poseen protuberancias que parecen colgar del cuerpo principal. Se aplica principalmente a los géneros Cirrus, Cumulonimbus, Cirrocumulus, Altocumulus, Altostratus y Stratocumulus.

- Virga

Se caracteriza por precipitación en dirección vertical o inclinada con forma de rayos en la parte inferior de una nube y que se evapora antes de lograr llegar a la superficie. Se encuentra con frecuencia en las nubes de los géneros Cirrocumulus, Altocumulus, Altostratus, Nimbostratus, Stratocumulus, Cumulus y Cumulonimbus.

- Praecipitatio

Es la precipitación que cae de las nubes y logra alcanzar la superficie. Se encuentra en los géneros Altostratus, Nimbostratus, Stratocumulus, Stratos, Cumulos y Cumulonimbus.

- Arcus

Se define como un rollo horizontal y denso con los bordes irregulares que se localiza en la parte inferior frontal de ciertas nubes. Además, cuando poseen grandes extensiones pueden aparentar un arco oscuro. Comúnmente se encuentra en nubes del género Cumulonimbus, y con menor frecuencia en Cumulus.

- Tuba

Son aquellas nubes verticales con forma de cono invertido que se salen de las bases de las nubes en dirección a la superficie. Se puede describir como un vórtice nuboso medianamente intenso. Al igual que la característica complementaria Arcus, se encuentran en nubes Cumulonimbus, y con menor frecuencia en nubes Cumulus.

- Asperitas

Esta variedad se caracteriza por tener una forma de olas muy bien definida en la parte inferior de la nube. Tiende a ser más desordenada y menos organizada horizontalmente, en comparación con la variedad undulatus. Se distingue porque posee ondas que pueden tener apariencia suave o moteada. En ocasiones puede tener pequeñas porciones que parecen descender como segmentos con punta. Diferencias en los niveles y la iluminación puede provocar efectos visuales muy sorprendentes. Suele ocurrir en los géneros Stratocumulus y Altocumulus.

- Fluctus

Esta característica complementaria es de vida corta y con forma de olas de mar, usualmente en la parte superior de la nube. Ocurren con mayor frecuencia en los géneros Cirrus, Altocumulus, Stratocumulus y Stratus; ocasionalmente se puede observar en nubes del género Cumulus.

- Cavum

Corresponde a un hueco comúnmente circular (en ocasiones alargado) bien definido en una nube de capa delgada de gotas de agua muy frías. Se puede observar la característica complementaria Virga o briznas de Cirrus cayendo de la parte central del hueco. Es normal que aumente su tamaño con el tiempo. El caso lineal o alargado es típico del paso de una aeronave. Su ocurrencia es típica en nubes del género Altocumulus y Cirrocumulus y muy extrañamente en Stratocumulus.

- Murus

Se caracteriza por ser un descenso abrupto y localizado en la base de las nubes Cumulonimbus, el cual puede dar origen a la característica complementaria tuba. Suelen asociarse con supercélula o multicélula de tormenta. Se desarrollan en la parte de la nube que no está generando precipitación y comúnmente representa la presencia de una fuerte corriente ascendente.

- Cauda

Esta característica se describe como una cola horizontal en bajas alturas que se extiende desde la zona de precipitación de una supercélula de una Cumulonimbus. Suelen estar unidas a las nubes tipo muro. El movimiento de la nube se da lejos de la zona de precipitación en dirección a la nube tipo muro. Suele estar acompañado de una corriente de ascenso que puede ser observado en la unión de la nube tipo muro y la de tipo cola.

2.1.6 Nubes accesorio

Estas nubes se definen como aquellas nubes de menor tamaño que acompañan a las nubes principales. Pueden estar separadas o parcialmente unidas a los cuerpos de nubes principales. Para este tipo de nubes se distinguen cuatro tipos según el "International Cloud Atlas" (World Meteorological Organization, 2017).

- Pileus

Corresponde a una nube de extensión horizontal pequeña, con forma de gorro o sombrero, que se sitúa en la parte superior de los cuerpos nubosos cumuliformes. Es normal observar varias pileus superpuestas. Se pueden observar en los géneros Cumulus y Cumulonimbus.

- Velum

Es un tipo de nube de gran extensión horizontal que se sitúa sobre la parte superior de un cuerpo cumuliforme. También puede estar conectada con uno o varios de estos cuerpos cumuliformes que suelen atravesarla. Suelen ocurrir en nubes Cumulus y Cumulonimbus.

- Pannus

Porciones de nubes sin forma que pueden generar una capa continua de nubes. Pueden estar por debajo o al lado de otras nubes e incluso se pueden conectar a las nubes principales. Se pueden encontrar con nubes de los géneros Altostratus, Nimbostratus, Cumulus y Cumulonimbus.

- Flumen

Son nubes de baja altura asociadas con supercélulas de tormentas convectivas. Se colocan en dirección paralela a las corrientes de viento de bajas alturas. Tienden a moverse en dirección hacia la supercélula. Se forman a partir del flujo entrante hacia la supercélula de la tormenta debido al frente cálido que se encuentra. La nube se mueve en dirección de la corriente de ascenso de la tormenta. Es importante notar que la nube se encuentra separada de la nube de la tormenta.

2.1.7 Nubes especiales

Estas nubes son resultado de casos particulares y focalizados de algún fenómeno generador de nubes. Estas nubes pueden ser formadas por efectos humanos o naturales. Se destacan seis tipos diferentes los cuales se describen brevemente a continuación. Las nubes del tipo Flammagenitus se generan como consecuencia de un efecto convectivo iniciado por focos de calor como fogatas, incendios forestales o erupciones volcánicas. Por su parte las nubes Homogenitus son resultado de la actividad humana como procesos industriales. Se hace distinción de las nubes generadas por condensación debido al paso de una aeronave, la cual

resulta ser un caso especial de las Homogenitus. Las nubes Homomutatus son resultado de nubes del tipo Homogenitus que persisten por un periodo de tiempo determinado y que toman una apariencia similar a las nubes del género Cirrus debido a la influencia de fuertes vientos altos. Por su parte las Citaractagenitus se generan en las zonas de cataratas debido a la caída del agua. Finalmente, Silvagenitus corresponde a nubes que se generan sobre los bosques debido a la evaporación de humedad.

Es necesario notar que a estas nubes se les da el nombre del género que les corresponde, seguido por las características complementarias y variedades correspondientes, y al final se coloca el nombre del tipo de nube especial que corresponde. Por ejemplo, se puede tener la nube Cirrus floccus homomutatus.

En el Apéndice 1 se puede observar un resumen de la clasificación de las nubes.

2.2 Imágenes y satélites

2.2.1 Composición de la luz

Debido a que el programa hace uso de imágenes satelitales como fuente de información es conveniente hacer un acercamiento preliminar a la información desde la composición de la luz.

La luz corresponde a un espectro de ondas electromagnéticas compuestas por una serie de franjas de longitudes de ondas distintas, las cuales poseen características propias que provocan que se traten de manera especial. Dentro del espectro electromagnético se encuentra la zona de luz la cual se divide en tres segmentos principales. El primer segmento es la luz ultravioleta, el segundo segmento es la luz visible y el tercer segmento es la luz infrarroja. Debido a que el espectro electromagnético es continuo, los límites que separan a cada uno de los segmentos es aproximado por lo que no se tienen fronteras definidas para cada uno de los rangos. Sin embargo, se utilizan ciertos valores determinados para poder realizar las mediciones correspondientes (Serway, Jewett, 2008).

Tanto la luz ultravioleta como la luz infrarroja no son perceptibles por el ojo humano por lo que se utilizan diferentes métodos para poder hacer visibles estos segmentos de luz. Debido a que las imágenes satelitales de interés se encuentran en el rango infrarrojo, el enfoque principal está dado en este ámbito. Así, la luz infrarroja se encuentra entre longitudes de onda que rondan desde los 10^{-3} a los 10^{-7} m, lo que implica que tiene bajas frecuencias.

Comúnmente, este tipo de radiación es emitida por cuerpos cálidos, pero se encuentra en la región lejana del infrarrojo (Wilson, Buffa, Lou, 2007). En la Figura 14 se puede observar el espectro electromagnético.

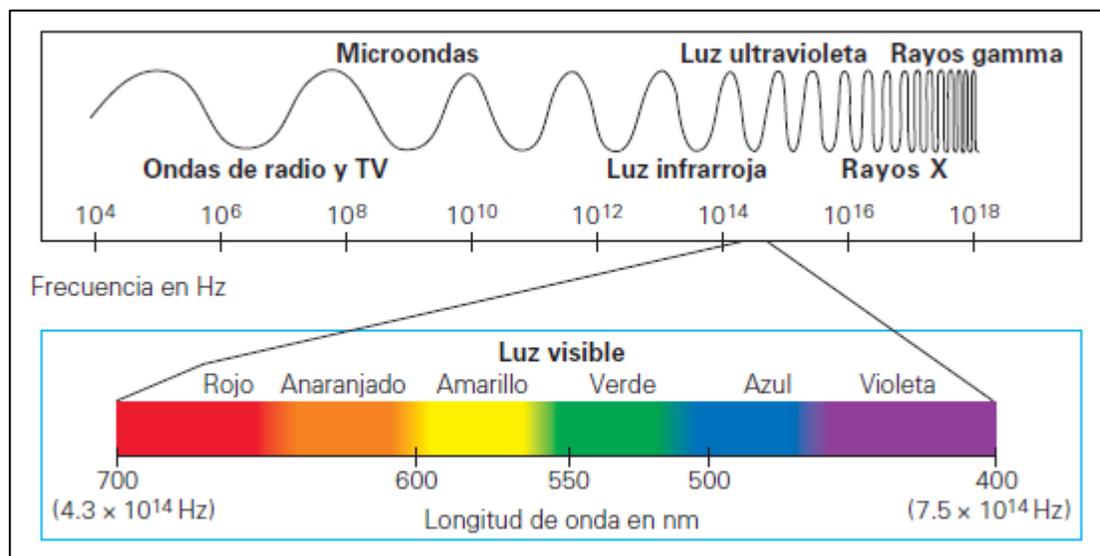


Figura 14. Espectro electromagnético
Fuente: Wilson, Buffa, Lou, 2007.

Si bien las longitudes de ondas infrarrojas no son percibidas por el ojo humano, estas son utilizadas en diversos procedimientos. Los satélites son capaces de captar radiación emitida por las nubes en diferentes longitudes de onda, entre las que se incluyen las ondas infrarrojas. La Ley de Distribución de Planck es aplicada por medio de los diferentes sensores de los satélites de modo que, por medio de este proceso, se logra relacionar una determinada longitud de onda con la temperatura de los cuerpos nubosos por medio del brillo aparente en la superficie de la nube (Simon, 1968). Para tal fin los satélites se encargan de crear imágenes que permitan al ojo humano ver esta franja del espectro infrarrojo.

2.2.2 Satélites

Los satélites en un principio poseían funciones muy limitadas, las cuales eran las de reflejar señales electromagnéticas, pero con el paso del tiempo se les incorporaron nuevas funciones como la captación de información (Huidobro, 2007). Luque y Amengual (2007) señalan que en 1960 se colocó el primer satélite meteorológico que perteneció a la serie de satélites TIROS (*Television Infrared Observation Satellites*), lo que mostró la necesidad de colocar más satélites debido a la utilidad que poseían para diversos fines.

Según Pratt & Allnut (2020), en la actualidad los satélites tienen formas muy variadas y con muchos tamaños. Entre los más pequeños se encuentran los satélites denominados cubesats, con un bajo costo de producción, con forma de cube de 0,1 m de largo y con un peso no mayor a 1 kg. Por otro lado, se pueden tener satélites, como los del tipo GEO (órbita geoestacionaria), con un peso de 6000 kg y una serie de sistemas que van desde transpondedores hasta propulsores, antenas, entre otros.

Las aplicaciones que se pueden obtener de los satélites son muy diversas, tales como militares, telecomunicaciones, observación del espacio exterior y meteorológicas. La transmisión de telecomunicaciones y señales de televisión se han vuelto el mercado más lucrativo para los satélites. Esta transmisión de información requiere de sistemas potentes tanto receptores como transmisores. Si bien estos detalles se han explicado para el caso de señales de telecomunicación, es necesario que los satélites meteorológicos cuenten con buenos sistemas de comunicación, donde las antenas forman un papel crucial en la recepción y transmisión de información (Pratt & Allnut, 2020).

Las primeras imágenes utilizadas en el proyecto se encuentran en periodos de 30 minutos entre imagen y poseen una resolución de 8 km por pixel y un tamaño de 960 x 500 pixeles. Adicionalmente, Zou (2020) recalca que estas imágenes poseen su mayor precisión sobre los océanos puesto que las deformaciones por curvatura de la tierra y los relieves del suelo son mínimas. Por su parte, los datos obtenidos de los satélites GOES tienen gran importancia debido a la posibilidad de obtener imágenes de la evolución de los sistemas climáticos.

Para el caso del proyecto los satélites meteorológicos son los de principal interés, pues estos han permitido obtener una cantidad de información muy variada respecto a las condiciones climáticas del planeta. A modo de ejemplo, para el caso de análisis meteorológico se puede obtener información con respecto al tamaño de partículas de las nubes, procesos de formación y evolución de cuerpos nubosos y tormentas, propiedades de las partes superiores de las nubes (Zou, 2020). Con los nuevos satélites de la serie GOES-R se incorporan una serie de funcionalidades adicionales que permiten la captación de datos sobre el movimiento diario y por estaciones del Sol y toma datos en tiempo real de las condiciones in situ de la órbita del satélite (NOAA & NASA).

2.2.3 Estabilización de órbita satelital

En relación a la altura a la que se localizan los satélites se encuentra relacionada por medio del equilibrio de fuerzas correspondiente entre la fuerza centrípeta que se obtiene de la velocidad angular respecto a la Tierra y la fuerza gravitacional (Zou, 2020). En este punto Bunke & Valek (2001) aproximan dicha distancia a 35700 km mientras que Zou (2020) localiza los satélites a 35787,6 km. Adicionalmente, en el Apéndice 2 se puede observar una lista actualizada de los satélites geoestacionarios que han sido lanzados, tanto en funcionamiento como fuera de línea.

Debido a que los satélites se encuentran orbitando libres en el espacio, se deben realizar correcciones a sus órbitas periódicamente puesto que se pueden desviar debido a la influencia de fuerzas externas como las fuerzas gravitacionales del Sol y la Luna y los efectos que posee la Tierra debido a su forma no esférica (Pratt & Allnutt, 2020).

Para fines de estabilizar los satélites se cuenta una serie de sistemas diferentes para realizar este tipo de correcciones. Alrededor de los años 1990 el método utilizado para estabilizar la órbita de los satélites consistía en hacer girar el cuerpo del satélite entre 30 y 100 revoluciones por minuto. Actualmente, este método ya no se utiliza con tanta frecuencia debido a que presenta una serie de desventajas a la hora de la recopilación de datos e información y la maniobrabilidad de las antenas y demás equipos. Adicionalmente, el giro se restringe entre 10 a 30 revoluciones por minuto. Por otro lado, estos satélites cuentan con ventajas tales como simpleza de diseño, más livianos y comúnmente más económicos (Dimov, 2019).

En la actualidad los satélites cuentan con sistemas de estabilización de tres ejes por medio de la incorporación de sistemas de motores de cohetes y propulsión eléctrica que permiten restituir su órbita cuando estos se desvían. Además, las ruedas de momento son un método adicional que permite realinear el satélite cuando se presenta un giro respecto a alguno de sus ejes. Típicamente se cuenta con tres ruedas de momento, una por cada eje (Dimov, 2019).

También cuentan con sistemas de telemetría, los cuales permiten al satélite determinar su posición para así corregir su órbita. Para utilizar telemetría, se necesita contar con estaciones determinadas en la superficie de la Tierra. El envío de información es esencial pues a partir de dicha información es que se obtienen datos como el ángulo azimutal y la elevación

del satélite. Este sistema también permite reacomodar las antenas del satélite (Pratt & Allnutt, 2020).

Un método adicional de estabilización de los satélites corresponde al método de gradiente de gravedad. El principio de este método se enfoca en que el cuerpo del satélite va a alinear de manera inercial el eje con menor momento de inercia con la vertical. Su principal ventaja radica en su bajo consumo de energía (Dimov, 2019).

La corrección de la órbita y posición de los satélites tiene gran importancia, ya que permite que se puedan mantener los satélites orientados en las direcciones correctas. En especial cuando se tiene antenas direccionales, por ejemplo, la orientación de los instrumentos de los satélites meteorológicos que necesitan estar en dirección a la Tierra para poder realizar las mediciones correspondientes de manera adecuada (Dimov, 2019).

Pratt & Allnutt (2020) explican que las correcciones de las órbitas de los satélites comúnmente se realizan en intervalos de dos a cuatro semanas, lo que ayuda a minimizar el error de desviación. Adicionalmente, estas correcciones de posición se separan en dos. Las correcciones de posición este-oeste se realizan primero y luego, dos semanas después, las correcciones de posición norte-sur se llevan a cabo.

2.2.4 Satélites meteorológicos

Luque & Amengual (2007) explican que los primeros grupos de satélites con fines meteorológicos fueron los de la serie TIROS y dieron paso a la observación de los diferentes fenómenos que suceden en el planeta. Adicionalmente, Pratt & Allnutt (2020) recalcan que la obtención de información de manera satelital es muy eficiente y, además, rápida en comparación con otros métodos de transmisión y obtención de datos meteorológicos. Esto da como resultado que la observación por medio de satélites posea un interés muy elevado para poder entender el funcionamiento de los sistemas climáticos de la Tierra. Por su parte, Dimov (2019) explica que los satélites han evolucionado a través del tiempo, lo que ha permitido que estos ampliaran sus funciones de únicamente satélites climáticos a satélites ambientales.

Zou (2020) expone que los satélites GOES permiten la obtención de imágenes horizontales de alta resolución en los rangos visibles, cercanos al infrarrojo e infrarrojo del espectro electromagnético. Por su parte Davis (2011) afirma que el satélite GOES-14 poseía la capacidad de captar información en 5 canales diferentes: uno en canal visible, uno en vapor

de agua y tres en canal infrarrojo. Las imágenes utilizadas son provenientes del *GOES Project Science* en conjunto con la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Es importante recalcar que la posición de los satélites GOES se encuentra sobre la línea del Ecuador, y que la desviación de los rayos de luz con respecto a esta posición, en dirección al satélite, pueden generar distorsión en los datos obtenidos por estos. Estas distorsiones generan que los píxeles de las imágenes en latitudes alejadas posean menor precisión que los píxeles de latitudes bajas. Por tal motivo, es necesario considerar la posición del satélite y su ángulo cenital y azimutal (Zou, 2020).

Bunge & Valek (2001) exponen que hay cuatro clasificaciones de los satélites de acuerdo con su órbita. Además, Pratt & Allnutt (2020) explican que las órbitas de los satélites poseen órbitas elípticas, las cuales se rigen por las tres leyes de movimiento planetario de Kepler; por lo tanto, se deben de tomar en consideración los desplazamientos de los satélites para poder hacer las correcciones adecuadas a los datos que se obtienen; sin embargo, se pueden tener satélites con órbitas circulares a como se explica más adelante.

Los satélites de órbita baja se envían a una distancia entre 320 a 800 km de la superficie. Estos satélites viajan a altas velocidades para evitar que la gravedad los atraiga, debido a lo anterior pueden darle la vuelta al planeta en 90 minutos (Luque & Amengual, 2007). Estos satélites son usados muy comúnmente para vigilancia de la superficie terrestre. Entre los usos que se les dan están la agricultura, localización de focos de calor, producción de mapas, observación climática y para sondeo de zonas arqueológicas (Pratt & Allnutt, 2020).

Los satélites de órbita elíptica orbitan el planeta en 12 horas con una órbita en forma de óvalo y su movimiento es comúnmente de norte a sur, aunque esta puede variar su posición y ser inclinada. Adicionalmente debido a que su órbita es elíptica, la velocidad angular del satélite es variable debido a que debe cumplir con las leyes de gravitación universal de Newton. Estas órbitas poseen excentricidades distintas de cero y su desplazamiento se puede modelar de acuerdo con las ecuaciones de una elipse. El parámetro para determinar si una órbita de un satélite es elíptica es cuando la excentricidad se excede en un valor de 10^{-3} (Pratt & Allnutt, 2020).

Los satélites de órbita polar funcionan igual que los satélites de órbita baja, pero en lugar de viajar de este a oeste, viajan de norte a sur (Bunke & Valek, 2001). Suelen reconocerse con las siglas PEO del inglés, aunque también se les suele conocer como POES (Polar Operational Environmental Satellites). Las órbitas de estos satélites tienden a ser mucho más bajas y cortas que las de los satélites GOES, por lo que pueden viajar de polo a polo de la Tierra en tan solo 100 minutos y pueden tomar fotos en alta resolución. Sus órbitas normalmente rondan alturas entre los 800 y 1200 km por encima de la Tierra (Dimov, 2019).

Para la importancia del proyecto se les da más énfasis a los satélites de órbita geosincrónica, puesto que son los que se utilizan para el desarrollo del programa y de los cuales se toman las imágenes satelitales sujetas al estudio.

Según la NOAA & NASA (2016), la nueva serie de satélites GOES-R son nombrados con una letra antes de su lanzamiento, y posterior a estar colocados en su correspondiente órbita, se les denomina por medio de un número. El proyecto GOES-R se encuentra compuesto por cuatro satélites los cuales son GOES-R, GOES-S, GOES-T y GOES-U. El primero de estos satélites fue lanzado el 19 de noviembre de 2016 y se cambió su denominación a GOES-16 cuando alcanzó su órbita geosincrónica (Schmit, et al., 2017).

Bunke & Valek (2001) explican que a este tipo de satélites se les conoce como GEO de sus siglas en inglés, y están sobre el Ecuador a 37 500 km. Zou (2020), Pratt & Allnutt (2020) y Dimov (2019) corroboran dicha información y, adicionalmente, explica que estos satélites poseen una velocidad angular igual a la de la Tierra, por lo que les toma un periodo de 23 horas 56 minutos y 4.1 segundos darle una vuelta completa al planeta. Por tal motivo, estos satélites se encuentran siempre sobre la misma posición con respecto a la superficie de la Tierra. Debido a esta característica, a este grupo de satélites se les conoce como satélites geoestacionarios.

Adicionalmente, Dimov (2019) afirma que debido a las grandes distancias a las que se encuentran orbitando estos satélites, permiten monitorear condiciones climáticas en un hemisferio completo de manera constante. A pesar de su amplio rango, poseen la desventaja de que la resolución de las imágenes captadas no puede llegar a ser tan alta como las imágenes generadas por satélites de órbita polar.

Para poder cumplir que un satélite sea del tipo geoestacionario, se debe cumplir con tres condiciones las cuales son: la órbita del satélite debe ser perfectamente circular, debe encontrarse orbitando a la altura correcta y, a como ya se mencionó, estos deben encontrarse sobre la línea del Ecuador. Si alguna de estas consideraciones no se cumple, se dice que el satélite tiene una órbita geosincrónica, pero no se clasifica como geoestacionario (Pratt & Allnutt, 2020).

Estados Unidos actualmente posee dos satélites orbitando de manera geoestacionaria y dos satélites en órbitas polares. Para el caso de los geoestacionarios, los satélites se encuentran cubriendo la zona este y oeste del continente. Estos dos satélites si bien tienen sectores de cobertura dedicados para cada uno, se superponen en las zonas centrales; por lo que hay zonas del continente cubiertas por ambos satélites. El complejo de satélites, tanto los GOES como los POES pertenecen a un proyecto colaborativo entre la NOAA y la NASA (Dimov, 2019).

Para la primera aproximación del desarrollo del proyecto se utilizaron imágenes tomadas por el satélite GOES-14 el cual era propiedad de la NOAA, y se encontraba a una altura aproximada de 35 800 km. Este satélite fue puesto fuera de línea y no se encuentra transmitiendo actualmente. El compendio de imágenes satelitales se tomó del trabajo previo realizado por Aguirre (2012). Adicionalmente, el satélite GOES-16 con posición GOES-E (posición este), la cual se aprecia en la Figura 15, que cubre completamente la zona de América Central. Se espera que este satélite tenga una vida útil que se extienda hasta mediados de 2030 (Schmit, et al., 2017; NOAA & NASA, 2016).

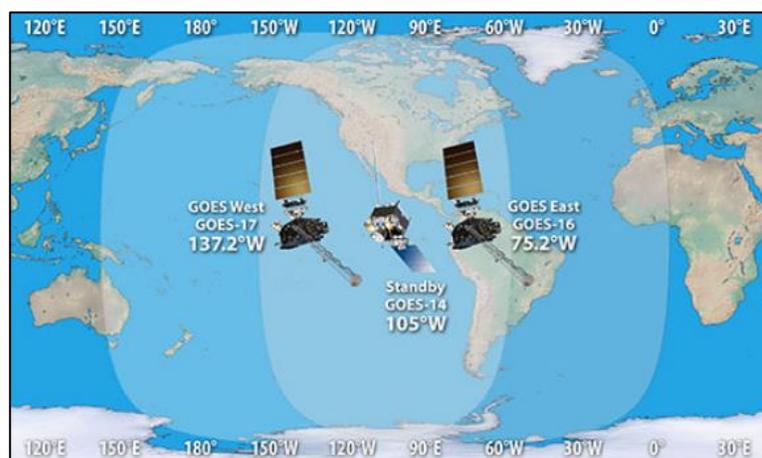


Figura 15. Posición de los satélites geoestacionarios activos
Fuente: NOAA, NASA (<https://www.goes-r.gov/mission/mission.html>)

2.2.5 Imágenes satelitales

El satélite GOES-16 (posición este), cuenta con un radiómetro de barrido giratorio para rango visible e infrarrojo el cual cuenta con 8 canales para captación en rango visible y 6 detectores térmicos, los cuales permiten descomponer la radiación en 16 bandas distintas, las cuales se pueden observar en la Figura 16. Esta selección se realiza por medio de una rueda giratoria en frente del detector. El canal de interés para el análisis corresponde al canal 11 del generador de imágenes avanzado (ABI) del GOES-16, el cual capta radiación en frecuencias de $8,4 \mu\text{m}$ en intervalos de 30 minutos que corresponde al rango infrarrojo (Dimov, 2019; Schmit, et al., 2017).

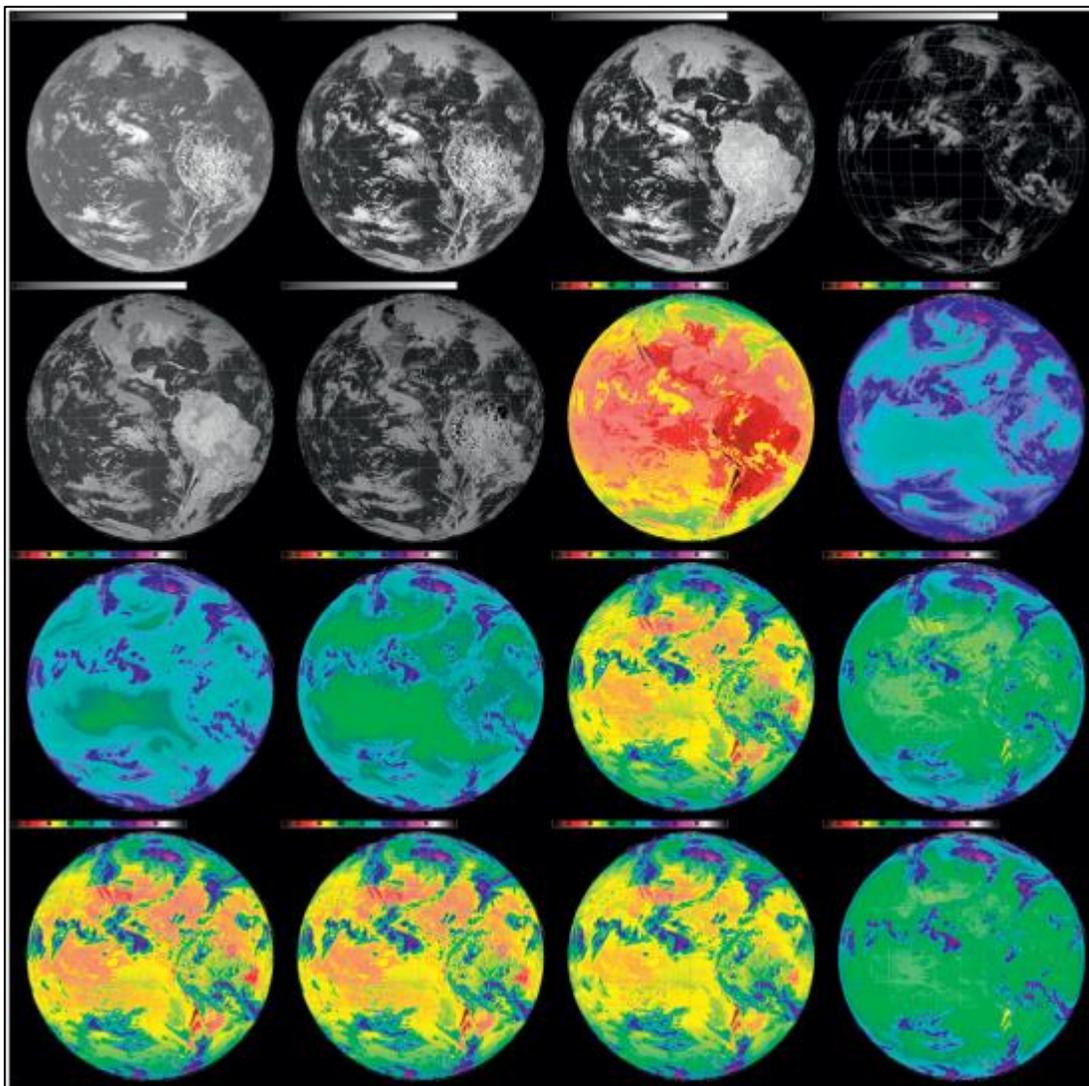


Figura 16. Bandas activas de ABI en el satélite GOES-16
Fuente: Schmit, et al., 2017.

Según (Dimov, 2019), el escaneo en el satélite GOES-16 difiere ligeramente con respecto al que utilizaba el satélite GOES-14. El método implementado actualmente por el GOES-16 permite que los diferentes canales multiespectrales funcionen de manera simultánea, barriendo franjas en dirección norte a sur. Este barrido se realiza a una velocidad de 20° por segundo, primero en dirección este a oeste y luego en dirección oeste a este. Este proceso de escaneo permite que el satélite realice una imagen de 3000 por 3000 píxeles en cuestión de 41 segundos. El resultado obtenido es la creación de imágenes con resoluciones de 4 km por píxel para el rango infrarrojo (Gómez, Obregón & Rocha, 2013).

Las imágenes de un satélite actualmente son del tipo digital debido a su modo de captación y almacenaje. Lo que permite realizar un análisis más profundo y detallado de las imágenes satelitales. Las principales funciones y objetivos de la captación e interpretación de imágenes satelitales son la identificación de características y cuerpos oscuros o fenómenos que liberen radiación, y la determinación de los mecanismos físicos que producen esas características o fenómenos (Gómez, Obregón & Rocha, 2013).

En relación con la resolución de las imágenes y la resolución de los satélites, se debe hacer la distinción de que la resolución de la imagen satelital puede ser diferente a la resolución de los instrumentos de los satélites. La resolución de los instrumentos para captación de imágenes del satélite se puede definir como el elemento más pequeño en la Tierra que puede ser observado con detalle y es función del campo de visión, los sensores ópticos y la distancia desde el satélite hasta la Tierra. Por su parte, la resolución de la imagen puede variar debido al proceso de construcción de la imagen por medio de los datos captados (Dimov, 2019; Chuvieco, 2000).

Para la generación de imágenes, los satélites utilizan una serie de filtros que se colocan en frente del sensor que recibe la radiación, los cuales permiten la captación de determinado rango de longitudes de onda del espectro electromagnético. Adicionalmente, los sensores de los satélites cuentan con miles de receptores diminutos que reaccionan a la radiación recibida. Estas mediciones se conocen como espectrales los cuales, en su forma más sencilla, convierten en un número digital el valor de reflectancia captado por el sensor (Gómez, Obregón & Rocha, 2013).

En la actualidad, existen cinco tipos de tipos de imágenes que se generan a partir de los satélites: rango visible, infrarrojas, de vapor de agua, microondas, y cercanas al infrarrojo.

Para el caso del estudio las imágenes de interés corresponden a las del rango infrarrojo puesto que presentan ciertas ventajas, en comparación con los otros tipos de imágenes. Una ventaja que presentan las imágenes infrarrojas en comparación a las del rango visible corresponde a que las imágenes del rango visible no sirven a menos que se tenga iluminación proveniente del Sol, por lo que cuando se encuentran en el lado oscuro, estas imágenes no son de utilidad. Además, es difícil distinguir entre nubes altas y bajas (Dimov, 2019).

Por otro lado, las imágenes infrarrojas presentan el inconveniente de que pueden tomar nubes con bajas temperatura, pero no precipitables que se encuentran a gran altura, como nubes de precipitación de manera errónea. Adicionalmente, se puede tener precipitación de nubes calientes o por razones orográficas, que resulta difícil de estimar por medio de las imágenes infrarrojas (Nasrollahi, 2013).

Según Dimov (2019), las imágenes infrarrojas son captadas por una serie de sensores en el rango infrarrojo del espectro electromagnético. Estas imágenes captan la radiación infrarroja emitida por las nubes o la superficie de la Tierra y se asocian con medidas de temperatura. Por tal motivo, las nubes de gran altura van a verse brillantes, mientras que la superficie de la Tierra o nubes de baja altura aparecen como sectores oscuros.

La inversión de colores en las imágenes infrarrojas es resultado del proceso de captación de la radiación, por lo que radiaciones con longitudes de onda relativamente más largas van a aparecer como sectores oscuros, mientras que las zonas más frías van a tener colores brillantes. Adicionalmente, los rangos de las imágenes infrarrojas rondan entre 1 y 30 μm , pero las imágenes meramente de rango infrarrojo se toman entre las bandas de 3,9 y 12,5 μm (Gómez, Obregón & Rocha, 2013).

Por su parte, Nasrollahi (2013) explica que el uso de imágenes infrarrojas como medio de obtención de precipitación es muy complicado, por lo que recomienda el análisis e implementación de un análisis multispectral. En este tipo de análisis se hace uso de información de varios tipos de imágenes satelitales que permitan identificar con mayor precisión zonas con nubes que no precipitan y zonas con nubes que sí precipitan. Entre algunos de los métodos multispectrales que menciona se pueden destacar el método de microondas pasivas con imágenes infrarrojas, el uso del algoritmo de redes neuronales y el algoritmo de auto calibrado multivariado de recuperación de precipitación.

Una característica muy importante de las imágenes infrarrojas, que se había marcado como desventaja de las imágenes visibles previamente, corresponde a la habilidad de captar imágenes en la noche, debido a que estas imágenes se generan a partir de la radiación emitida por los cuerpos y no necesita radiación externa para poder identificarlos.

2.2.6 Transmisión y recepción de datos

Los sistemas de comunicación por medio de satélites existen gracias a que la Tierra posee una forma esférica, puesto que las señales y ondas de comunicación viajan en líneas rectas. El medio de comunicación con los satélites se da mediante las antenas. Estas antenas funcionan comúnmente bajo una sola frecuencia de transmisión, aunque se pueden tener satélites con antenas que funcionan con dos tipos de frecuencias diferentes. Por tal motivo, no es raro encontrar satélites con más de una antena (Pratt, Alnutt, 2020).

Los tipos de antenas utilizados en los satélites son las antenas de cable, de bocina, reflectoras y antenas de matriz en fase. Las antenas de cable se utilizan en frecuencias VHF (muy alta frecuencia) y UHF (ultra alta frecuencia) principalmente para la comunicación con el sistema de telemetría. Las antenas de bocinas funcionan en el rango de microondas. Su función es la de permitir la conexión de diferentes anchos de banda para comunicación. Adicionalmente, funcionan como alimentadores de los reflectores. Este tipo de antena se encuentra limitada a un máximo de 23 dB por lo que las antenas reflectoras o de matriz en fase serían adecuadas en caso de necesitarse mayor potencia (Pratt & Allnutt, 2020).

La NOAA & NASA (2017) y Schmit (2017) explican que los satélites se mantienen transmitiendo datos crudos de la información captada a la Estación Terrestre de la NOAA (GES). Luego de procesar esos datos en la GES, la información procesada se envía de vuelta al satélite en donde se retransmite a los centros de servicios meteorológicos y diferentes grupos que hagan uso de la información, tanto en Estados Unidos como a nivel mundial. El envío de información también se puede realizar desde la Estación Terrestre de la NOAA hacia otros lugares de destino sin necesidad de enviar la información de vuelta al satélite.

Al momento de transmitir señales de satélites se debe tomar en consideración que tanto el hielo como la lluvia representan obstáculos para poder enviar y recibir señales. Por tal motivo, las señales que se envían con frecuencias mayores a los 10 GHz utilizan la lluvia como principal medio de transporte de señal. Para tal motivo, se hace uso de un rango de precipitación entre 10 a 100 mm/h para el cálculo de transmisión de señales (Pratt & Allnutt,

2020). Debido a la pérdida de intensidad de la señal por la existencia de vapor de agua entre los sensores del satélite y los cuerpos analizados, se debe realizar una corrección radiométrica de la señal. Este efecto se conoce como "limb darkening" y se acrecienta conforme el ángulo cenital es mayor (Hobouchian, 2017).

2.2.7 Teledetección

A través de los años, la teledetección ha mostrado una gran utilidad para la recolección de información y posterior análisis de esta. El uso de la teledetección ha permitido una mejor comprensión de los sistemas hidrológicos de la Tierra. Adicionalmente, el hecho de que actualmente se cuente con registros temporales y espaciales de información son una gran ventaja para poder desarrollar análisis hidrológicos; a su vez, esto puede permitir la mejora de métodos de análisis ya existentes. La gran ventaja que posee la teledetección para el análisis de precipitación radica en que las imágenes satelitales cubren áreas de gran tamaño por lo que representan una mejor fuente para análisis en comparación con métodos terrestres que son puntuales y en muchas ocasiones escasos (Khaki, 2020).

En un principio, la NASA envió sus satélites experimentales para determinar la importancia que podían tener estos para la determinación de condiciones atmosféricas y terrestres, por lo que lanzaron el TIROS-1, el cual fue el primer satélite dedicado al análisis del clima. Lamentablemente, no se contaba con sistemas de comunicación adecuados por lo que se incorporaron 122 m de cinta de filmación para las cámaras, de modo que cuando el satélite no se encontrara cerca de una estación terrestre, se pudiera guardar la información que el satélite captaba (Dimov, 2019).

Para la recepción de información de los satélites se han desarrollado metodologías para poder contactarlos, pero la más utilizada es la teledetección. Debido a que los satélites se encuentran orbitando de manera permanente, no se cuenta con la posibilidad de establecer un contacto físico para poder captar o extraer la información, por lo que se realiza mediante ondas sonoras. Este proceso es el que se conoce como teledetección (Chuvienco, 2000). Efectivamente no hay un contacto directo entre las nubes y los satélites para medir la precipitación, pero se puede relacionar la radiación emitida por las nubes de modo que se puede tener un estimado de la precipitación (Menzel, 2006).

Adicionalmente, Dimov (2019) amplía la definición de teledetección como el proceso de detección y monitoreo de las diferentes características físicas de un área determinada, por

medio de la medición de la radiación emitida, de manera remota. Este término, se encuentra estrictamente limitado a los métodos de obtención de datos que hacen uso del espectro electromagnético.

Por su parte, Menzel (2006) explica que la teledetección permite obtener e interpretar información recolectada a distancia por los sensores de los satélites, sin que estos tengan un contacto físico con el cuerpo observado. Adicionalmente, es necesario aclarar la teledetección no se restringe para el uso de satélites por lo que posee una gran variedad de posibles aplicaciones diferentes fuera del ámbito de captación de información por medio de satélites.

De acuerdo con Dimov (2019), resulta importante notar que existen diferentes tipos de teledetección los cuales se muestran de manera resumida. El primer tipo de teledetección corresponde a la teledetección activa en la que el sistema encargado de la obtención de la información cuenta con su propia fuente de energía que envía al objeto que se desea estudiar. A partir de esto, se mide la cantidad de radiación regresada por el objeto.

El segundo método es la teledetección emitida pasiva, la cual hace uso de fuentes de energía remotas que se encuentran emitiendo energía que luego es reflejada por los cuerpos de interés y que finalmente es capturada por los sensores.

El tercer caso, y de mayor interés para el análisis corresponde a la teledetección reflejada pasiva la cual recolecta datos de energía electromagnética irradiada o reflejada de manera natural por los cuerpos. Este método de teledetección posee tres formas de recolección de datos distintos: la extensión, la emisión y la dispersión.

La obtención de información de manera remota por medio de los satélites ha resultado ser de gran utilidad, puesto que permite obtener datos de interés sobre áreas de gran extensión a muy bajos costos. Adicionalmente, por medio de los avances en tecnología, se tiene la posibilidad de realizar imágenes en diferentes longitudes de ondas a los cuales se les conoce como datos multiespectrales o hiperespectrales. Esto da como resultado tres tipos principales de imágenes: las pancromáticas, multiespectrales y las hiperespectrales (Gómez, Obregón & Rocha, 2013).

2.2.8 Modelo Hidro-estimador

Un punto clave en el análisis de imágenes de satélite infrarrojas es la precisión de los resultados obtenidos a partir del análisis. Este es el pilar principal del desarrollo del programa,

por lo que poder comparar los datos obtenidos con medidas de precipitación ya obtenidas para eventos de precipitación es un buen punto de partida y comparación. El uso de imágenes satelitales en rango infrarrojo, de los satélites geoestacionarios, resulta muy conveniente puesto que son más rápidas de obtener, en comparación con otros métodos como los satélites de órbita baja.

En vista de que el método hace uso de brillo aparente de las nubes en rango infrarrojo, y que, además, no existe una relación directa entre la temperatura de brillo y la precipitación; el modelo realiza relaciones empíricas de la tasa de precipitación entre los centros convectivos y los no convectivos. Esto ayuda a distinguir en parte las diferencias existentes entre la precipitación convectiva y la precipitación estratiforme (Hobouchian, et al., 2017).

El método Hidro-estimador fue desarrollado en el 2002 como una iniciativa para poder determinar la precipitación generada por las nubes, a partir de imágenes satelitales en rango infrarrojo. Este método utiliza las temperaturas de brillo de las imágenes satelitales infrarrojas para la identificación de potenciales zonas de precipitación para determinar la tasa de precipitación. Esta información se mezcla con el Global Forecast System (GFS) del National Center for Environmental Prediction (NCEP) para considerar la disponibilidad de humedad, evaporación, efectos de perfiles termodinámicos y modulación orográfica presentes en la zona en que se capta la imagen. Las estimaciones de precipitación generadas por el método Hidro-estimador se realizan cada 15 minutos para la zona continental de América (Dimov, 2019).

Adicionalmente, el modelo permite estimar la porción de cobertura de nieve por medio de un algoritmo adicional, pero para el caso del programa, no posee relevancia puesto que en Costa Rica no se cuenta con zonas precipitación de este tipo.

Por su parte Hobouchian, et al. (2017), recalca que estos factores son de suma importancia debido a que no todos los sistemas de precipitación se generan de la misma manera. Adicionalmente, recalca una serie de limitaciones que se deben de tener en consideración para el uso la técnica.

La primera limitación corresponde a que la técnica puede llegar a ignorar la precipitación generada por nubes del tipo nimbostratus si no hay efectos convectivos cercanos que permitan identificarlas en la imagen satelital. Esta limitación se tiende a acrecentar especialmente en casos en los que se analizan los eventos de precipitación extrema.

Adicionalmente, la técnica puede ignorar el aporte de las nubes stratus que pueden generar precipitación en época lluviosa si no hay efectos convectivos presentes. Finalmente, presenta cierta dificultad para poder excluir nubes no precipitantes, tales como las Cirrus finos, las cuales son nubes de hielo y que presentan temperaturas de brillo similares a las nubes convectivas y generadoras de precipitación.

2.3 Estadística descriptiva y eventos extremos

Para poder realizar el análisis correspondiente de las imágenes de satélite se necesita hacer uso de la estadística por lo que es necesario conocer principios básicos. Para iniciar, la estadística descriptiva se encarga de caracterizar series de datos en estudio mediante la organización y resumen de estos. Algunos métodos utilizados son la tabulación, graficación o solución numérica directa. Adicionalmente, se cuenta con la estadística inferencial la cual globaliza resultados de una población a partir de una muestra (Walpole, Myers, Myers y Ye, 2012). Para comprender adecuadamente lo que se entiende por estadística se debe tener conocimiento de una serie conceptos básicos los cuales se definen a continuación en base a lo que exponen Walpole, Myers, Myers y Ye en su libro "Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias":

Población: la población es el conjunto infinito o finito de datos con características comunes. Por tal motivo, se puede entender por población a un conjunto de objetos, datos, seres vivos, entre otros, los cuales son el objeto de estudio.

Es importante diferenciar entre la población y la muestra. Esta segunda hace relación a la porción de la población que se toma para realizar el análisis y con la que se extrapolan los resultados obtenidos.

Variable: corresponde a la característica que se quiere estudiar. Esta puede variar y tomar valores diferentes dentro de una misma población. Es necesario que sea posible medirla u observarla para poder desarrollar un estudio estadístico adecuado. Los dos tipos de variables que se manejan son las variables cuantitativas y las cualitativas.

Las variables cuantitativas son aquellas a las cuales se les puede asignar un valor numérico obtenido a través de un proceso matemático, mientras que las variables cualitativas son aquellas a las cuales se les asigna un tipo de cualidad. Por ejemplo, se puede hablar de variables de color, género, tamaño, forma, entre otras.

Dato: Corresponde al valor medido para la variable en estudio. Es correcto decir que una variable tiene n número de datos los cuales son valores individuales obtenidos a partir de un análisis u observación y pertenecen a cada uno de los individuos que conforman la muestra estadística.

Cabrea (2008) señala que, para un evento aleatorio, para un total de resultados "c" y un conjunto de valores favorables "a", la probabilidad de ocurrencia "p" va a estar dada por la razón de "a" con "c".

$$p = \frac{a}{c} \quad (1)$$

Si se evalúa el evento de manera infinita donde "n" es el número de eventos, se esperaría que la razón de casos favorables "f" al evaluarla en un límite al infinito, este valor tenderá a la probabilidad. Expresado matemáticamente se tendrá lo siguiente:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f}{n} = \frac{a}{c} = p \quad (2)$$

Una consideración especial es que, para cualquier caso, la probabilidad de ocurrencia de un evento no puede ser menor que cero ni mayor que uno.

Debido a que el análisis de datos estadísticos puede ser muy complicado, se recurre a metodologías como las distribuciones de frecuencia. Estas son un ordenamiento de los datos de acuerdo con la frecuencia de ocurrencia de cada uno. Se pueden hablar de frecuencias absolutas las cuales son la cantidad de ocurrencias totales de determinado dato y se representa usualmente como f_i y la suma total es igual a la cantidad de observaciones. La frecuencia acumulada corresponde a la suma consecutiva de las frecuencias absolutas y se representa como F_i . Por su parte, la frecuencia relativa corresponde a la división de la frecuencia absoluta entre el total de datos y se representa por h_i . Finalmente, la frecuencia relativa acumulada corresponde a la división de las frecuencias acumuladas entre el total de los datos y se denota como H_i (Montgomery y Runger, 2003).

Walpole, Myers, Myers y Ye (2012) señalan que una distribución de frecuencias se encuentra compuesta por clases o intervalos, la marca de la clase (punto medio) y amplitud o

tamaño del intervalo. En cuanto a medidas de posición hacen referencia a que esta es una forma de resumir el conjunto de datos en un único parámetro. Adicionalmente, para el total de los datos se utilizan medidas de posición tales como la media aritmética, la cual corresponde a la medida promedio de los datos; la mediana es el valor que parte los datos en dos mitades iguales. Por su parte, la moda corresponde al valor que se presenta más en el grupo de datos. También se usan los cuartiles los cuales dividen la distribución de frecuencia en cuatro partes iguales. Finalmente, los percentiles funcionan de la misma manera que los cuartiles, únicamente dividen la distribución en cien partes.

Una metodología adicional para realizar los análisis de datos se utilizan funciones de distribución. Estas funciones son muy diversas y se debe buscar que los datos se ajusten de la mejor manera al comportamiento de la función para obtener un comportamiento que pueda representar el evento de estudio de la mejor manera (Walpole, Myers, Myers & Ye, 2012).

Para el caso del estudio se toman en consideración la función de Valor Extremo Generalizado (GEV), Gumbel, Exponencial, Logística Generalizada y Generalizada de Pareto.

2.3.1 Medidas de posición

Para el cálculo y realización de análisis estadísticos, se utilizan las medidas de posición las cuales permiten observar tendencias en forma rápida y de manera resumida. Es importante notar que para el caso en el que los datos se agrupan hacia el centro de la distribución de los datos de la muestra, se dice que estas son medidas de tendencia central o centralización. Adicionalmente, si los valores se encuentran en cualquier parte de la distribución de los datos se les conoce como medidas de posición únicamente y en este caso se incluyen los cuantiles. (Salazar & del Castillo, 2018). Adicionalmente, la importancia de este tipo de medidas es que permiten observar el comportamiento de diferentes muestras al comparar estos valores (Walpole, Myers, Myers y Ye, 2012).

Cabrera (2008) resalta que es de suma importancia que dichas medidas conserven objetividad y no se presten para diferentes interpretaciones puesto que lo que se busca es poder determinar y comparar conjuntos de muestras. Además, la medida de posición debe estar determinada a partir de la totalidad de la muestra para que pueda ser un valor representativo de dicha muestra. En cuanto a su interpretación, estas deben ser lo más simples posibles para que no lleve a malas interpretaciones de los datos. Castillo y Salazar (2018) definen las medidas de posición más comunes, las cuales se explican a continuación.

- Promedio o media aritmética

La media se entiende como la suma de los valores de la observados divididos entre el total de observaciones. Uno de los inconvenientes que posee esta medida de posición radica en que es muy susceptible a desviarse si hay valores extremos en la muestra. De manera matemática se expresa como:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3)$$

Donde \bar{x} es el valor promedio, x_i es el valor del dato i y n es el número de observaciones de la muestra.

- Mediana

La mediana corresponde al valor el cual divide el total de la muestra en partes iguales cuando el valor de la totalidad de observaciones han sido ordenadas. Este valor puede o no corresponder con un valor de la muestra y puede ser útil cuando el promedio no es representativo de un grupo de datos. Si la muestra tiene una cantidad de datos impar la mediana se encontraría en la posición $\frac{n}{2} + 1$, pero si es par la mediana se encuentra entre $\frac{n}{2}$ y $\frac{n}{2} + 1$. Matemáticamente se expresa como:

$$\text{Caso impar: } \frac{n}{2} + 1 \quad (4)$$

$$\text{Caso par: } \frac{\frac{n}{2} + (\frac{n}{2} + 1)}{2} \quad (5)$$

- Moda

El valor de la moda corresponde al valor que posee el mayor número de ocurrencia dentro de la muestra. Este valor al igual que la mediana no presenta sesgo por la presencia de valores extremos. La desventaja de este tipo de medida de posición para estudios numéricos es que en muchos de los casos no existe una moda como tal o se puede presentar más de una moda en la misma muestra de datos.

- Percentiles

Los percentiles corresponden a una forma de medida que divide los datos de la muestra en cien partes iguales. Para el caso de los percentiles se tienen dos casos principales los que corresponden a cuando los datos se encuentran agrupados y cuando los datos están sin agrupar. Para el caso de datos agrupados en una tabla de frecuencias se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_i = L_i + \frac{i \left(\frac{n}{100} \right) - F_i}{f_i} \cdot c ; \text{ con } k = 1, 2, 3, \dots, 99 \quad (6)$$

Donde L_i es el límite inferior real de la clase del percentil i , n es el número de datos, F_i es la frecuencia acumulada de la clase que antecede a la clase del percentil i , f_k es la frecuencia de la clase del percentil k y c es la longitud del intervalo de la clase del percentil k .

Para el caso de datos no agrupados se tienen dos situaciones especiales. La primera corresponde al caso en el que la cantidad de datos es par, y la segunda corresponde a cuando la cantidad de datos de la muestra es un número impar. Las ecuaciones para tales casos se muestran a continuación.

$$\text{Caso par: } P = \frac{A \cdot n}{10} \quad (7)$$

$$\text{Caso impar: } P = \frac{A(n+1)}{10} \quad (8)$$

Donde, A es el número del percentil y n es el número de datos de la muestra.

2.3.2 Método de L-momentos

Según Greenwood, Maciunas, Matalas & Wallis (1979), una función de distribución $F(x)$ con probabilidad $P(X \leq x)$ puede caracterizarse por momentos probabilísticos, los cuales están dados por la siguiente ecuación:

$$M_{i,j,k} = E[X^i F^j (1-F)^k] = \int_0^1 [x(F)]^i F^j (1-F)^k dF \quad (9)$$

Donde i, j, k son números reales y M son los momentos correspondientes y E es el valor de la esperanza.

Eslava (2011) recalca que a pesar que los L-momentos pueden ser semejantes a los momentos convencionales; los L-momentos permiten caracterizar una mayor cantidad de distribuciones de probabilidad, resultan ser menos sensibles a la asimetría y tienden a ser más confiables cuando hay valores muy desviados en la muestra de datos.

Las propiedades que caracterizan el método de L-momentos corresponden a la existencia del promedio, la cual asegura que, si el promedio de la distribución existe, entonces se pueden obtener los L-momentos correspondientes a esa distribución. La segunda propiedad corresponde a la unicidad, la cual explica que los L-momentos de una distribución existen y son únicos para esa distribución. Un punto de gran interés es que los L-momentos permiten obtener mejores estimadores que otros métodos utilizados para dicho fin (Naranjo, 2011).

Hosking & Wallis (1997) explican que los estimadores insesgados β_r se pueden obtener mediante la ecuación:

$$\beta_r = n^{-1} \sum_{j=r+1}^n \frac{(j-1)(j-2) \dots (j-r)}{(n-1)(n-2) \dots (n-r)} x_{j:n} \quad (10)$$

Donde n es el número de elementos de la muestra y r el índice del estimador.

Hosking & Wallis (1997), desarrollan los primeros cuatro estimadores insesgados a como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$\beta_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (11)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{n} \sum_{j=2}^n \frac{j-1}{(n-1)} x_j \quad (12)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{n} \sum_{j=3}^n \frac{(j-1)(j-2)}{(n-1)(n-2)} x_j \quad (13)$$

$$\beta_3 = \frac{1}{n} \sum_{j=4}^n \frac{(j-1)(j-2)(j-3)}{(n-1)(n-2)(n-3)} x_j \quad (14)$$

A partir de este punto se pueden calcular los diferentes parámetros correspondientes, dependiendo de las distribuciones de interés.

Eslava (2011) recalca que el método de L-momentos surge como un método alternativo para el análisis de las distribuciones probabilísticas en donde los casos en los que $i = 1$ y $j = 0$ denotado como $\mu_r = M_{1,0,k}$ e $i = 1$ con $k = 0$ denotado como $\beta_r = M_{1,j,0}$ poseen una importancia especial con $r = 0, 1, 2, \dots$. Los primeros cuatro parámetros $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$, los cuales son la media, la escala, la asimetría y la kurtosis respectivamente se obtienen mediante las siguientes expresiones.

$$\lambda_1 = \beta_0 \quad (15)$$

$$\lambda_2 = 2\beta_1 - \beta_0 \quad (16)$$

$$\lambda_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \quad (17)$$

$$\lambda_4 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0 \quad (18)$$

Adicionalmente, se pueden calcular valores adimensionales de los L – momentos, que suelen resultar muy convenientes para calcular los parámetros de las distribuciones (Hosking & Wallis, 1997). A continuación, se muestra la forma de dicha ecuación.

$$\tau_r = \frac{\lambda_r}{\lambda_2} \quad r = 3,4, \dots \quad (19)$$

También se puede calcular el parámetro L-CV que se entiende como coeficiente de L-variación, que se muestra a continuación:

$$\tau = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (20)$$

2.3.3 Distribución de Valor Extremo Generalizado (GEV)

La función de valores extremos hace un énfasis en el análisis de los valores de las colas (máximos y mínimos) de las distribuciones de frecuencia y no los valores medios. Este tipo de distribución desprecia los valores medios puesto que busca caracterizar situaciones extremas

(Molina, 2010). El análisis realizado por Fisher y Tippett en 1928 demostró que las distribuciones de valores extremos tienden a converger a una de las tres formas de distribuciones extremas que se expresan como tipo I, II y III.

Estas tres distribuciones forman parte de la distribución de Valores Extremos Generalizados cuando el conjunto de datos analizados es lo suficientemente grande. Las distribuciones tipo I, II y III se pueden utilizar por separado y son las que comúnmente se conocen como Gumbel, Frechet y Weibull respectivamente (Chow, Maidment & Mays, 1994). El caso particular de la distribución de Gumbel se analizará por separado más adelante.

Wilks (2019) expone que la función de densidad de probabilidad para la distribución de Valores Extremos Generalizados está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\beta} \left[1 + \frac{\kappa(x - \zeta)}{\beta} \right]^{-1 - \frac{1}{\kappa}} \cdot e^{-\left[1 + \frac{\kappa(x - \zeta)}{\beta} \right]^{-\frac{1}{\kappa}}}, \quad 1 + \kappa(x - \zeta)/\beta > 0 \quad (21)$$

Donde κ es un parámetro de forma, β es un parámetro de escala y ζ es un parámetro de posición.

Si se integra analíticamente se obtiene la función de densidad acumulada que se puede observar en la siguiente ecuación:

$$F(x) = e^{-\left(1 + \frac{\kappa(x - \zeta)}{\beta} \right)^{-1/\kappa}} \quad (22)$$

Si se invierte la ecuación se obtiene la ecuación para el cálculo del cuantil que se expresa a continuación:

$$F^{-1}(x) = \xi + \frac{\alpha}{\kappa} (1 - (-\log(p)))^\kappa \quad (23)$$

Adicionalmente, Chow, Maidment & Mays (1994) explican que los tipos I, II y III se determinan por medio de los diferentes valores que toma κ . Para $\kappa = 0$, se tiene la distribución tipo I, mientras que para $\kappa < 0$ se tiene la distribución tipo II. Finalmente, para el caso en el que $\kappa > 0$ se tiene la distribución tipo III. En la Figura 17, se puede observar el comportamiento que poseen las 3 distribuciones de manera separada.

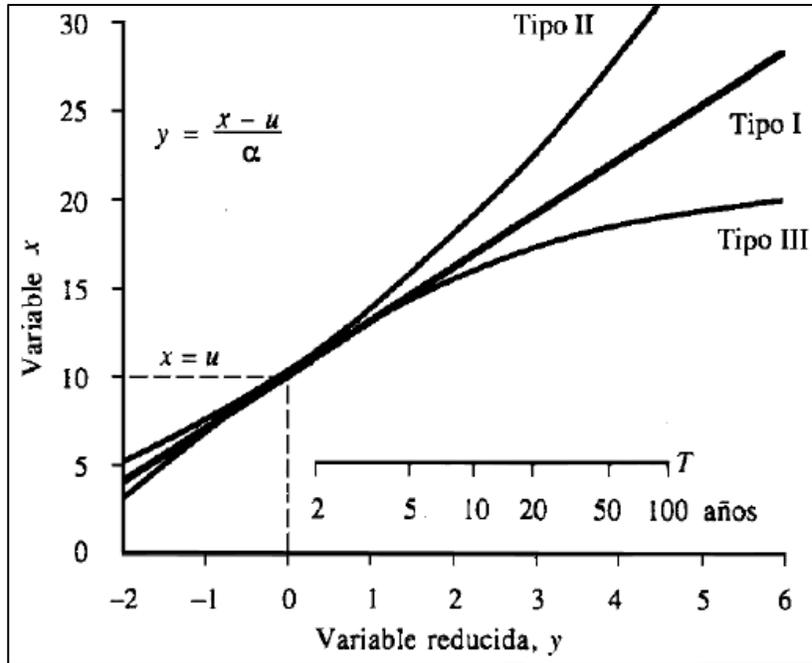


Figura 17. Distribuciones Tipo I, II, III en el plano graficado de "x" contra la variable reducida "y"
 Fuente: Chow, Maidment & Mays, 1994.

Adicionalmente, Wilks (2019) explica que es necesario tener en consideración que los parámetros de forma, posición y escala deben ser calculados. Por lo tanto, es usual utilizar los métodos de máxima verosimilitud o método de L-momentos para dicho fin. Para el caso del programa Pro-imgSAT se realiza el ajuste de los parámetros por medio del método de L-momentos.

Posteriormente, se puede hacer cálculo de los parámetros de la distribución de Valores Extremos Generalizados α, κ y ζ . Hosking & Wallis (1997) calculan estos parámetros mediante las ecuaciones:

$$\kappa \approx 7,8590c + 2,9554c^4 \text{ donde } c = \frac{2}{c + \frac{\lambda_3}{\lambda_2}} - \frac{\log(2)}{\log(3)} \quad (24)$$

$$\alpha = \frac{\lambda_2 \cdot \kappa}{(1 - 2^{-\kappa})\Gamma(\kappa + 1)} \quad (25)$$

$$\zeta = \lambda_1 - \alpha \frac{1 - \Gamma(\kappa + 1)}{\kappa} \quad (26)$$

2.3.4 Distribución Gumbell

Wilks (2019) explica que debido a que esta distribución es un caso específico de la distribución de Valores Extremos Generalizados, la función de densidad de probabilidad se puede expresar como:

$$f(x) = \frac{1}{\beta} \cdot e^{\left(-\exp\left[-\frac{x-\zeta}{\beta}\right]-\frac{x-\zeta}{\beta}\right)} \quad (27)$$

Si se observa, en la ecuación anterior, no se presenta el parámetro de forma κ , puesto que para este caso se toma como cero. Al igual que la distribución GEV, ζ es el parámetro de posición y β el parámetro de escala.

Por su parte, la función de densidad acumulada de la distribución Gumbell se puede observar en la ecuación (7):

$$F(x) = e^{-\exp\left[-\frac{x-\zeta}{\beta}\right]} \quad (28)$$

Al calcular la función inversa se obtiene la ecuación para el cálculo del cuantil:

$$F^{-1}(x) = \zeta - \beta \cdot \ln(-\ln(p)) \quad , \quad 0 < p < 1 \quad (29)$$

Debido a que la distribución Gumbell es un caso particular de la distribución GEV, presenta el mismo inconveniente para el cálculo de los parámetros de posición y escala por lo que Wilks (2019) presenta la siguiente opción para realizar la aproximación correspondiente al parámetro de escala.

$$\hat{\beta} = \frac{s\sqrt{6}}{\pi} \quad (30)$$

Donde s es la desviación estándar de la muestra.

Para el cálculo del parámetro de posición se tiene la siguiente ecuación:

$$\hat{\zeta} = \bar{x} - \gamma\hat{\beta} \quad (31)$$

Donde \bar{x} es el promedio y $\gamma = 0,57721$ es la constante de Euler.

2.3.5 Distribución Exponencial

La función exponencial se obtiene al analizar un caso particular de la distribución Gamma, la cual se deriva de la función matemática Gamma. En la Figura 18 se muestran casos posibles de formas de la distribución Gamma, en donde se observa el caso de la distribución exponencial para la cual $\alpha = 1$ (Walpole, Myers, Myers y Ye, 2012).

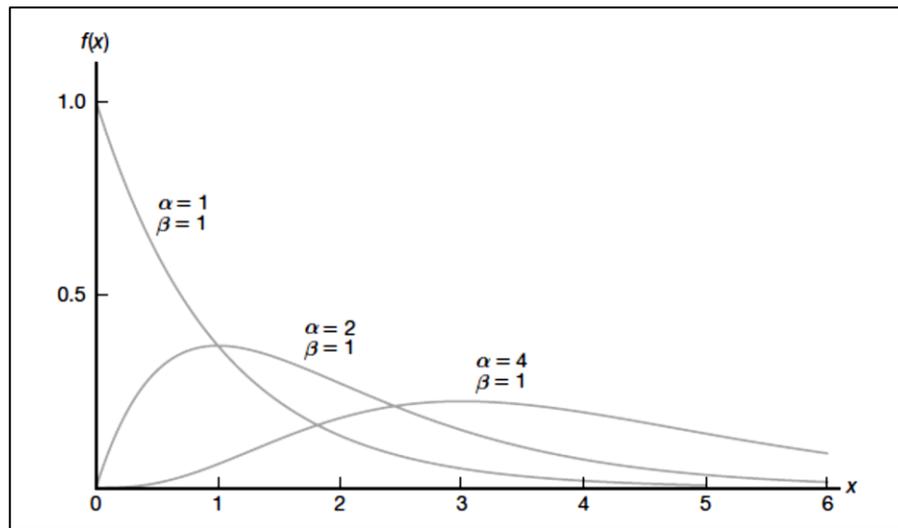


Figura 18. Formas de la distribución Gamma
Fuente: Walpole, Myers, Myers y Ye, 2012.

La función de densidad de probabilidad para la distribución exponencial se puede observar en la ecuación siguiente (Wilks, 2019):

$$f(x) = \frac{1}{\beta} e^{-\frac{x}{\beta}}, \quad x \geq 0 \quad (32)$$

Donde β es el parámetro de escala.

La función inversa se obtiene al despejar el valor de x de la ecuación anterior, con lo que se obtiene el valor de la precipitación teórica para un valor de probabilidad asociado a los datos que se estén analizando.

$$F^{-1}(x) = -\beta \ln(1 - p) \quad 0 \leq p < 1 \quad (33)$$

Si se observa la Figura 18, la forma de la gráfica posee una caída exponencial. Adicionalmente, si se integra la ecuación de manera analítica se obtiene la ecuación de la función de densidad acumulada que se aprecia en la siguiente ecuación y que corresponde a al área bajo la curva para la cual $\alpha = 1$.

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (34)$$

Por su parte, la media corresponde al valor del parámetro de escala β y la varianza es el cuadrado del parámetro de escala (β^2) (Walpole, Myers, Myers & Ye, 2012).

En un principio la función de verosimilitud puede llevar a confusión dado que se ve igual que la función de densidad de probabilidad, pero la diferencia entre ambas es que la función de densidad de probabilidad utiliza valores aleatorios de los parámetros, mientras que la función de verosimilitud es una función de parámetros desconocidos con datos observados variables (Wilks, 2019).

Para el caso del parámetro de escala (β) de la función exponencial se obtiene que el parámetro se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (35)$$

Donde β es el parámetro de escala, n el número de datos de la muestra y x_i el dato i -ésimo de la muestra.

2.3.6 Distribución Logística Generalizada

Esta distribución posee tres parámetros los cuales son localización (ξ), escala (α) y forma (κ). Adicionalmente, la variable "x" varía en los siguientes rangos: $-\infty < x < \xi + \frac{\alpha}{\kappa}$ para $\kappa > 0$; $-\infty < x < \infty$ para $\kappa = 0$ y $\xi + \frac{\alpha}{\kappa} \leq x < \infty$ para $\kappa < 0$. La ecuación para la distribución logística generalizada está dada, según Hosking & Wallis (1997), por la ecuación:

$$f(x) = \frac{\alpha^{-1} e^{-(1-\kappa)y}}{(1 + e^{-y})^2} \quad (36)$$

$$\text{donde } y = \begin{cases} -\kappa^{-1} \ln \left(1 - \frac{\kappa(x - \xi)}{\alpha} \right) & , \kappa \neq 0 \\ \frac{x - \xi}{\alpha} & , \kappa = 0 \end{cases}$$

Al realizar el despeje correspondiente se puede obtener el valor teórico de precipitación asociado a un porcentaje de probabilidad dado para el pixel correspondiente. Esta ecuación se muestra en la siguiente ecuación:

$$F^{-1}(x) = \begin{cases} \xi + \frac{\alpha}{\kappa} \left(1 - \left[\frac{1-p}{p} \right]^\kappa \right) & , \kappa \neq 0 \\ \xi - \alpha \ln \left(\frac{1-p}{p} \right) & , \kappa = 0 \end{cases} \quad (37)$$

Adicionalmente, los L-momentos se pueden encontrar para un rango $-1 < \kappa < 1$

$$\lambda_1 = \xi + \alpha \left(\frac{1}{\kappa} - \frac{\pi}{\text{sen}(\kappa\pi)} \right) \quad (38)$$

$$\lambda_2 = \frac{\alpha\kappa\pi}{\text{sen}(\kappa\pi)} \quad (39)$$

$$\tau_3 = -\kappa \quad (40)$$

$$\tau_4 = \frac{1 + 5\kappa^2}{6} \quad (41)$$

Al despejar los parámetros de las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\kappa = -\tau_3 \quad (42)$$

$$\alpha = \frac{\lambda_2 \text{sen}(\kappa\pi)}{\kappa\pi} \quad (43)$$

$$\xi = \lambda_1 - \alpha \left(\frac{1}{\kappa} - \frac{\pi}{\text{sen}(\kappa\pi)} \right) \quad (44)$$

2.3.7 Distribución generalizada de Pareto

Hosking & Wallis (1997) explican que la distribución Generalizada de Pareto utiliza tres parámetros: localización (ξ), escala (α) y forma (κ). Además, el rango de aplicación de la

variable "x" se encuentra delimitados por el rango: $\xi \leq x \leq \xi + \frac{\alpha}{\kappa}$ para $\kappa > 0$; $\xi \leq x$. La función de la distribución de probabilidad está dada en la siguiente ecuación:

$$f(x) = \alpha^{-1} e^{-(1-\kappa)y}$$

$$\text{donde } y = \begin{cases} -\kappa^{-1} \ln\left(1 - \frac{\kappa(x - \xi)}{\alpha}\right) & \kappa \neq 0 \\ \frac{x - \xi}{\alpha} & \kappa = 0 \end{cases} \quad (45)$$

Al invertir la función anterior, se puede expresar la variable "x" en términos de la probabilidad de ocurrencia del evento con lo que se presentan las siguientes ecuaciones:

$$f^{-1}(x) = \frac{\alpha}{\kappa} \left(1 - e^{-\frac{\kappa \cdot \ln(P\alpha)}{1-\kappa}}\right) + \xi \quad \kappa \neq 0 \quad (46)$$

$$f^{-1}(x) = \xi - \frac{\alpha \cdot \ln(P\alpha)}{1 - \kappa} \quad \kappa = 0 \quad (47)$$

Para el caso de la distribución de Generalizada de Pareto se tienen los siguientes estimadores de los L-momentos.

$$\lambda_1 = \xi + \frac{\alpha}{1 + \kappa} \quad (48)$$

$$\lambda_2 = \frac{\alpha}{(1 + \kappa)(2 + \kappa)} \quad (49)$$

$$\tau_3 = \frac{1 - \kappa}{3 + \kappa} \quad (50)$$

$$\tau_4 = \frac{(1 - \kappa)(2 - \kappa)}{(3 + \kappa)(4 + \kappa)} \quad (51)$$

Al despejar los parámetros de interés de las ecuaciones anteriores se tienen las siguientes 3 ecuaciones:

$$\kappa = \frac{1 - 3\tau_3}{1 + \tau_3} \quad (52)$$

$$\alpha = (1 + \kappa)(2 + \kappa)\lambda_2 \quad (53)$$

$$\xi = \lambda_1 - (2 + \kappa)\lambda_2 \quad (54)$$

2.4 Métodos para estimación de precipitación

La estimación de precipitación por medio de imágenes infrarrojas es una forma para la cual se han desarrollado una serie de técnicas de las cuales se han utilizado para el programa Pro-ImgSAT las técnicas de Arkin, NAW y Autoestimador. Debido a que la técnica de Arkin se encontraba completa en el código del programa, se presentan las técnicas de NAW y Autoestimador.

Según Cuevas y Ramos (2011), el principio para la utilización de imágenes infrarrojas en la estimación de precipitación conlleva una serie de pasos a seguir. En este enfoque, en el Cuadro 2 se aprecia la relación existente entre el color del pixel de la imagen y la temperatura asociada a la parte superior de la nube, con la cual se estima la posibilidad de precipitación.

Cuadro 2. Relaciones para conversión de componente de color rojo a temperatura

Rango de temperatura (K)	Conversión	Valor de brillo	Fórmula invertida
$163 < T < 242$	$C_{brillo} = 418 - T(K)$	176 a 225	$T(K) = 418 - C_a$
$242 < T < 330$	$C_{brillo} = 660 - 2T(K)$	0 a 176	$T(K) = \frac{660 - C_a}{2}$

Fuente: Terán, Carbajal y Rosales (2011).

A partir de esta temperatura, se realiza la estimación correspondiente de la precipitación por medio de las técnicas con las que cuenta el programa.

Zou (2020), recalca que los límites que se establecen en los diferentes algoritmos para la distinción de los pixeles nubosos de los no nubosos son la clave para poder implementar de manera eficiente los diferentes métodos.

2.4.1 Técnica de NAW (Negri, Adler y Wetzel)

Negri y Adler (1993) explican que la Técnica NAW corresponde a una modificación de la técnica Griffith-Woodley creada en 1978. El principio de funcionamiento de la técnica es que se asignan porcentajes de lluvia a los pixeles que representan cobertura nubosa, lo que elimina la necesidad de calcular el porcentaje de cambio en la cobertura de las nubes.

La técnica utiliza un sistema en el que genera isotermas a las cuales asigna un valor de precipitación al dividir la imagen en 3 sectores bien definidos por los percentiles 10 y 50. El primer sector corresponde a la zona con temperaturas inferiores a los 253 K, que corresponden a -20,15 °C. A estos pixeles se les asigna un promedio de precipitación de 8 mm/h. La zona

comprendida entre el 10% y 50% se le asigna un valor de precipitación de 2 mm/h. Finalmente, la tercera zona, comprendida por el restante 50% de los píxeles de la imagen, presentan un valor de precipitación igual a 0 mm/h.

En este punto se puede observar una discrepancia de la técnica en el programa Pro-
imgSAT, pues los valores utilizados en el programa son de 9 mm/h para el percentil 10 y 1,8 mm/h para la zona entre el percentil 10 y el percentil 50. Se utilizan los valores establecidos en el documento de Negri y Adler (1993) debido a que el documento es más reciente en comparación al consultado por Aguirre (2012). En el Cuadro 3 se presentan los rangos en los que se observa la precipitación asignada dependiendo del percentil.

Cuadro 3. Resumen de técnica NAW

Rango de aplicación (100%)	Precipitación (mm/h)
$0 < x \leq 10$	8
$10 < x \leq 50$	2
$x > 50$	0

Fuente: Negri, Adler (1993).

2.4.2 Técnica de Autoestimador (Vicente, Scofield y Menzel)

Según Vicente, Scofield, Menzel (1998), la técnica de autoestimador utiliza el mismo principio que la técnica de NAW en la que se considera que aquellas nubes con temperaturas más bajas en su parte superior producen más precipitación que aquellas con temperaturas más altas. Esto se encuentra basado en la comparación de imágenes de satélite y radar superpuestas, en las cuales se observó que los puntos con tormentas convectivas corresponden con las zonas en las que las nubes se encuentran más frías con rangos de temperatura de 195 a 210 Kelvin.

Adicionalmente, el uso de un solo canal satelital complica la estimación de precipitación debido a la incapacidad de poder determinar la altura de la nube para descartar aquellas nubes que por su espesor no representan precipitación a pesar de presentar temperaturas bajas. Para tal fin se puede hacer uso de imágenes consecutivas con las que se puede estimar la posición de focos de precipitación en la imagen satelital. Posterior a la realización de una serie de ajustes mediante el uso de imágenes de radar y satélite, tanto en rango visible como

infrarrojo, se calibró una ecuación para aquellos pixeles que representan temperaturas entre los 195 a 260 Kelvin (Vicente, Scofield, Menzel, 1998).

$$R = 1,1183 \cdot 10^{11} \cdot e^{-3,6382 \cdot 10^{-2} \cdot T^{1,2}} \quad (55)$$

Donde R es la precipitación en milímetros por hora y T es la temperatura en Kelvin.

De acuerdo con Vicente, Scofield y Menzel (1998), los resultados que se obtienen a partir de la ecuación anterior no son verdaderamente efectivos. Lo anterior se debe a que hay una serie de condiciones y factores que pueden afectar la exactitud de los datos graficados a partir de la imagen satelital. Los factores a considerar se pueden resumir en factor de humedad y factor de velocidad de crecimiento de la nube.

Para el caso de la humedad, los autores definen un factor de corrección por humedad debido a que existen tendencias a sobrestimar la precipitación en condiciones secas, mientras que puede subestimar la precipitación generada en condiciones húmedas. Este factor se define como el producto del agua precipitable (PWRH) desde la superficie hasta el nivel de 500 hPa de presión multiplicado por la humedad relativa. El factor de corrección PWRH se ha encerrado entre los valores de 0,0 a 2,0. Para condiciones en las que PWRH es menor que 1,0 se considera que son condiciones ambientales bastante secas mientras que se considera relativamente húmedo si toma valores mayores a 1,0. Debido a detalles intrínsecos al método utilizado para la calibración, para condiciones de alta humedad (PWRH>1,0) no resulta adecuado el multiplicar por el factor correctivo cuando las temperaturas de la parte superior de la nube se encuentran por debajo de los 210 Kelvin. Si la temperatura se encuentra por debajo de los 200 Kelvin, se debería limitar la precipitación al valor promedio máximo de la zona geográfica.

Adicionalmente, Vicente, Scofield y Menzel (1998) explican que el factor de corrección de crecimiento de la nube es sumamente importante, puesto que se necesita discretizar entre las nubes que representan precipitación de aquellas que no lo hacen. Esto se debe a que Woodley y Sancho (1971) demostraron que el 90% de la precipitación que genera una nube es producto de solo el 50% de esta. Por tal motivo, si no se considera la evolución del sistema nuboso, se puede llegar a sobrestimar la zona precipitable. Bajo estas consideraciones se pueden identificar tres casos:

- Si los píxeles analizados de la primera imagen se vuelven más fríos en la segunda imagen, implica que el sistema se está intensificando y por ende se le asigna el valor de precipitación a los píxeles de la primera imagen.
- Si sucede que los píxeles de la segunda imagen son más calientes que los de la primera imagen, quiere decir que el sistema nuboso se está debilitando por lo que el efecto convectivo se detiene y, por tanto, no generan precipitación.
- El tercer caso resulta ser aquel en el que tanto los píxeles de la primera y la segunda imagen no varían de temperatura. Para este caso se conserva el valor de precipitación estimado.

En este caso, se define el factor de corrección por crecimiento de la nube como 0 o 1 y funciona para discretizar aquellas nubes que producen lluvia de las que no.

3 Descripción del programa y resultados

3.1 Descripción de las funcionalidades y mejoras del programa

El programa Pro-imgSAT tiene como propósito brindar una herramienta para realizar el análisis de imágenes satelitales en rango infrarrojo. Actualmente, el programa cuenta con cinco ventanas para distintos análisis. Inicialmente, se realizaron control de excepciones en el código del programa, que producían que se detuviera de manera inesperada. Adicionalmente, se incorporaron funciones faltantes y se reorganizó la distribución de los botones y ventanas para hacer más intuitivo el uso del programa para el usuario. También se optimizó el código y se corrigieron errores leves que se detectaron en algunos métodos. A continuación, se van a mostrar las ventanas del programa y se va a explicar el uso de cada una de ellas, además de detalles de importancia y mejoras realizadas.

La ventana principal que se observa en la Figura 19 permite cargar imágenes que se muestran en la lista que se observa en el lado izquierdo para poder aplicar filtros para mejorar la imagen, dependiendo del análisis que se desee realizar. El programa cuenta un filtro Gaussiano y un filtro Posterizado por el momento. Para el caso del filtro Posterizado, se le realizaron ajustes en el código que dificultaban su aplicación. Las imágenes filtradas pueden ser guardadas en diferentes formatos o pueden ser utilizadas en un análisis posterior. Adicionalmente, se puede realizar una suma de imágenes que es resultado de superponer las imágenes para poder observar la cobertura total de las nubes.

En la parte derecha se encuentran los botones que permiten abrir las demás ventanas con las que cuenta el programa. En la parte superior izquierda se puede observar la opción "Seleccionar todo" la cual se encarga de marcar con check todos los elementos cargados en la lista. Esta opción se incorporó pues en la versión anterior del programa se seleccionaban aquellas imágenes que no se quisieran incluir en el análisis lo que resulta poco intuitivo y puede llevar a confusiones. Además, con esta opción se pueden seleccionar y deseleccionar todas las imágenes a la vez por lo que se tiene un mejor control sobre las imágenes que se desean utilizar en el análisis.

Por su parte en la parte superior derecha se tienen recuadros que permiten observar el valor del pixel en coordenadas (x,y) y el valor del componente rojo del pixel.

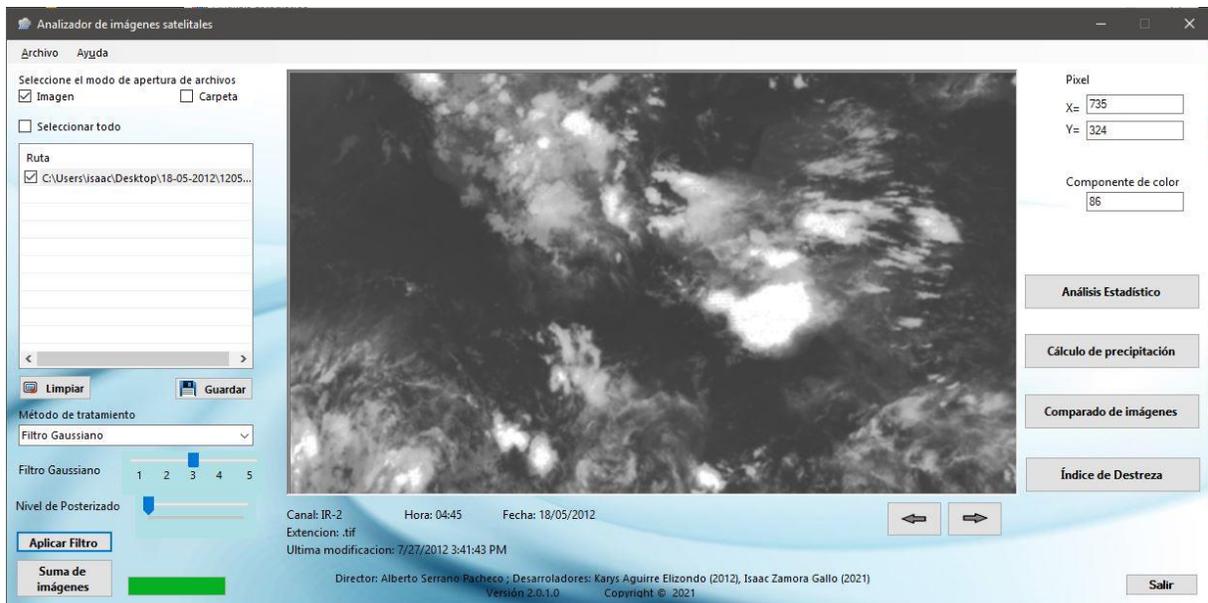


Figura 19. Ventana principal del programa Pro-ImgSAT

En la Figura 20 se observa la ventana para análisis estadístico, en la cual se pueden cargar imágenes específicas o un compendio de imágenes guardadas en una carpeta de la computadora. Una vez que se tienen las imágenes cargadas en la ventana se puede escoger entre cinco distribuciones de probabilidad: valores extremos generalizada (GEV), Gumbel, exponencial, Pareto generalizada y Logística generalizada. De las distribuciones anteriores se realizaron correcciones y mejoras en las distribuciones de Gumbel y GEV, mientras que las tres distribuciones restantes se incorporaron al programa desde cero. Adicionalmente, el programa permite realizar imágenes en dos modos diferentes. El primero corresponde a imágenes en escala de grises y el segundo realiza imágenes con color sectorizados dependiendo del valor de rojo resultante de la aplicación de las distribuciones de probabilidad. Esta asignación de colores se realiza determinando intervalos para el color rojo del pixel. El método de asignación de color se realiza por medio de la codificación denominada RGB (de sus siglas en inglés Red, Green, Blue) por medio del cual se realiza la combinación de estos tres colores primarios que pueden tomar valores del 0 al 255. Por tal motivo, los intervalos están divididos cada 25, lo que da como resultado la posibilidad de obtener 10 tonalidades diferentes de color en el mapa para facilitar su interpretación.

Posteriormente, se debe ingresar el porcentaje de probabilidad con el cual se desea trabajar. El modo en que solicita esta información se cambió pues el programa tenía porcentajes predeterminados que se mostraban en un desplegable, lo que producía que se

restringiera la aplicabilidad del programa. Por tal motivo, se eliminó este modo de ingreso de información por una casilla que permite ingresar el valor de probabilidad que se desee; lo que elimina la limitación de escoger entre valores fijos. Adicionalmente, al momento de iniciar el análisis el programa analiza si el valor ingresado corresponde realmente a un valor numérico. Si el valor ingresado no cumple con este requerimiento, muestra una ventana en la que solicita que se coloque un valor numérico entre 0 y 100, correspondiente a la probabilidad. Una vez que se inicia el análisis, este se realiza pixel por pixel de la imagen, lo que da como resultado un mapa de probabilidades.

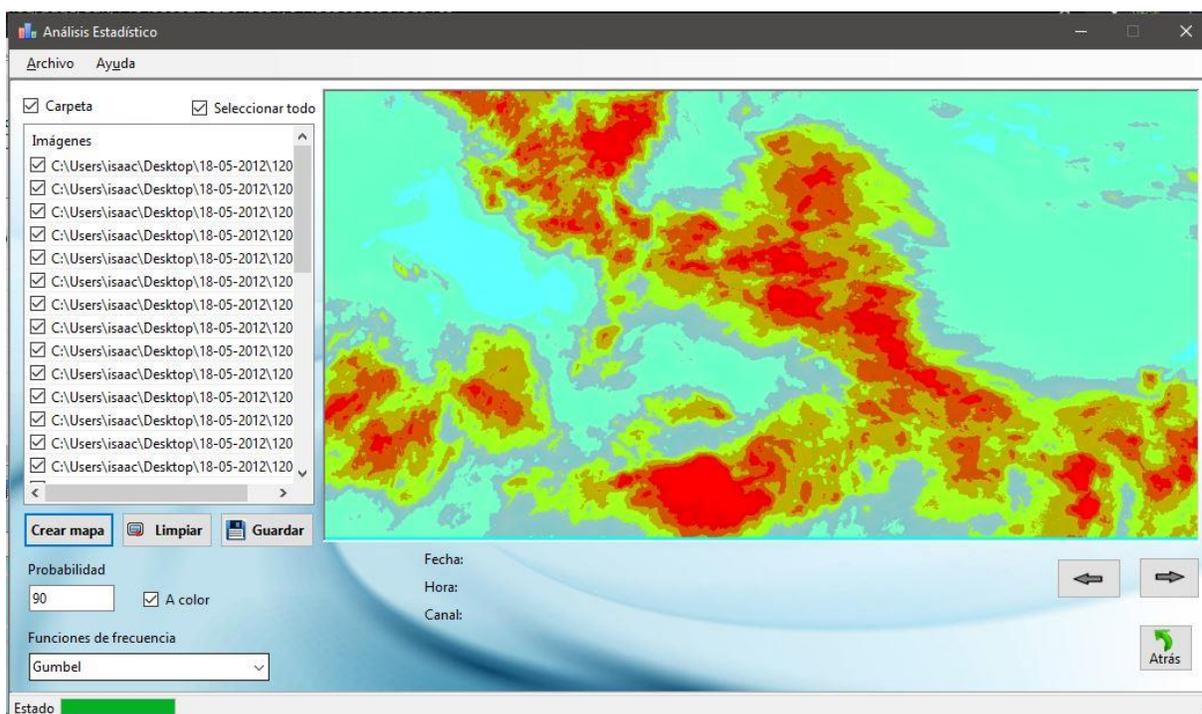


Figura 20. Ventana para análisis estadístico

En la Figura 21 se presenta la ventana para estimación de precipitación. En esta ventana se cuenta con un panel lateral izquierdo que permite visualizar la lista de imágenes cargadas. El programa realiza el análisis a una sola imagen y toma en consideración la separación de tiempo entre imágenes. Esta ventana permite cargar una imagen desde la ventana principal en caso de que se haya realizado la aplicación de un filtro y posteriormente se desee realizar el cálculo de precipitación. De igual manera, estos mapas de precipitación se pueden guardar en la computadora en diversos formatos, dependiendo de la conveniencia del usuario. Adicionalmente, en la parte inferior central se presentan dos recuadros, en los cuales

se puede ver el total de precipitación acumulada para la imagen y la precipitación puntual al desplazar el cursor del mouse por encima de la imagen resultante.

En este momento el programa cuenta con tres métodos para estimación de precipitación: técnica de Arkin, técnica de NAW y la técnica de Autoestimador. A la técnica de Arkin se le realizaron actualizaciones en los límites y ajustes menores al código para mejorar el funcionamiento. Por su parte, a la técnica de NAW se le hicieron correcciones importantes en el código puesto que no arrojaba resultados y se le revisaron los límites para asignación del valor de precipitación. En cuanto a la técnica de Autoestimador se le realizaron ajustes al código para mejorar su rendimiento. Se recortaron códigos innecesarios y se agregaron secciones de código que mejoran el análisis. Adicionalmente, se les incorporó color a las imágenes para que se puedan observar con mayor claridad los resultados. Además, se realizó una homogenización de los colores arrojados por las diferentes técnicas para que los mapas tengan una apariencia similar indistintamente del método utilizado, lo que permite establecer un punto comparativo entre imágenes.

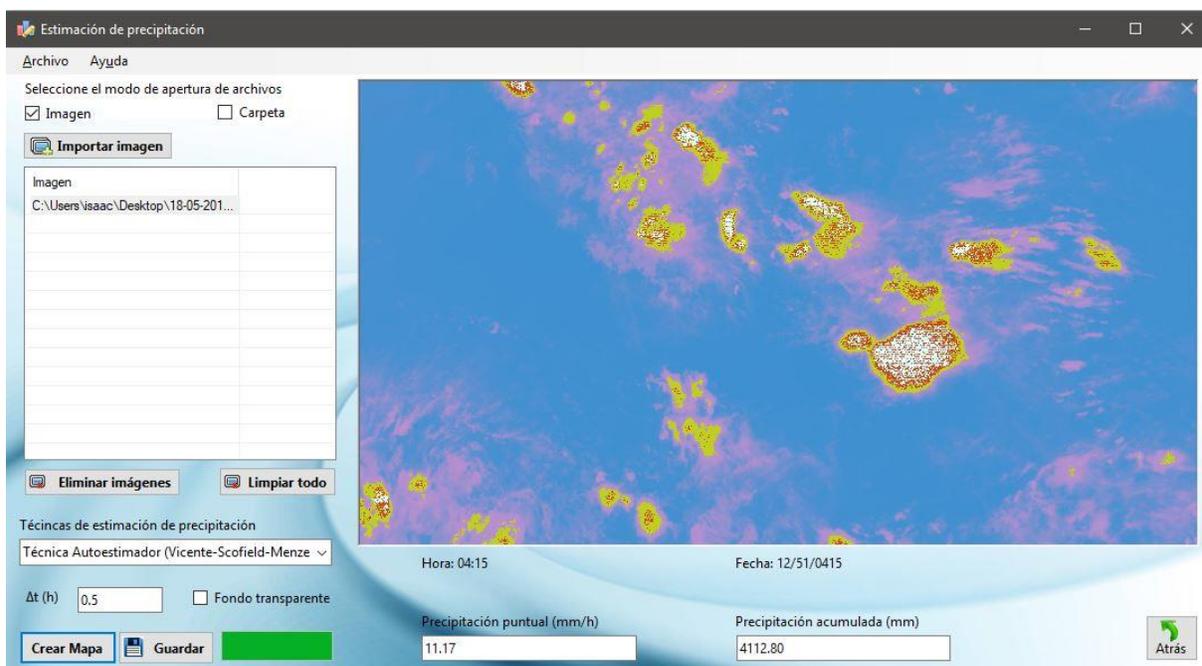


Figura 21. Ventana para estimación de precipitación

Adicionalmente, en la ventana de comparado de imágenes que se muestra en la Figura 22 se ajustaron las distribuciones de botones y se hicieron correcciones al código, como referencias a objetos y modo de carga y visualización de las imágenes para poder realizar la

comparación. El principal objetivo de esta ventana es poder realizar comparación de imágenes presentes con imágenes anteriores en las cuales se cuente con información de la precipitación de modo que se pueda estimar la similitud de las imágenes. Esto permitiría que se pueda determinar si la generación de determinado cuerpo nuboso produciría cierta cantidad de precipitación o un evento de cierta magnitud. En la parte derecha se muestra el índice de brillo y el porcentaje de coincidencia.

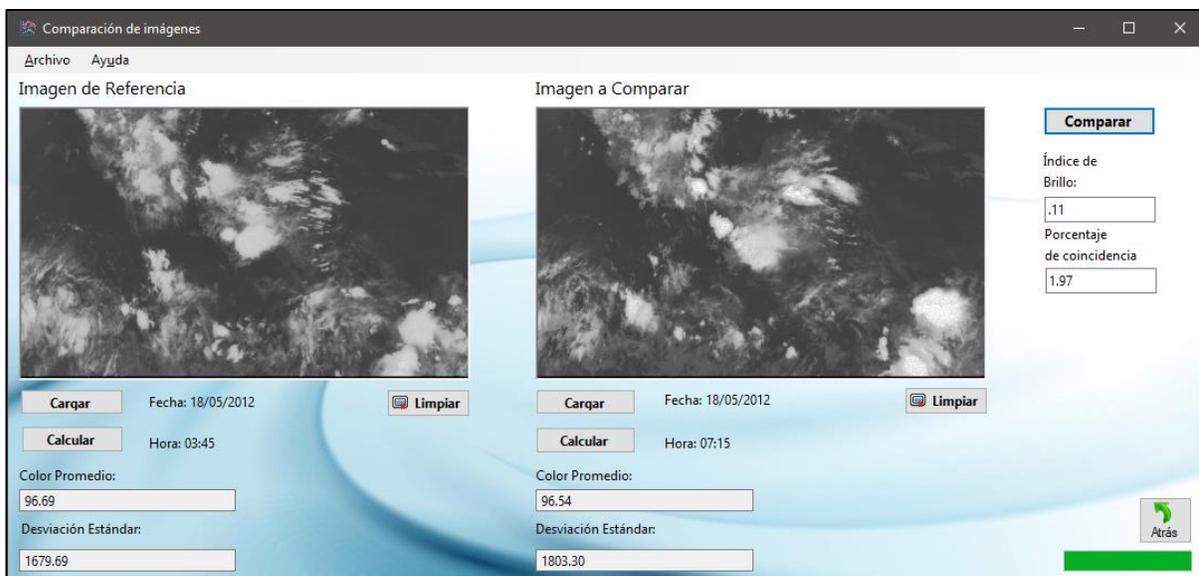


Figura 22. Ventana para comparado de imágenes

Finalmente, la ventana de índice de destreza que se observa en la Figura 23 tiene como fin poder analizar la evolución de un cuerpo nuboso y compararlo con una imagen de referencia, de la cual se cuentan con registros previos, de modo que permita desarrollar metodologías de alerta temprana en caso de requerirlo. En cuanto a las mejoras realizadas en esta sección, se redistribuyeron la totalidad de los elementos presentes en la ventana para mejorar su facilidad de uso. Adicionalmente, se incorporó un botón de guardar para poder exportar el gráfico en caso de necesitarlo. En la parte derecha se observa una tabla con el valor del índice de destreza y la antelación en horas. Esta tabla no estaba mostrando datos en un principio por lo que corrigió este problema y además se agregó un botón que permite exportar la tabla directamente a Excel para poder hacer uso de los datos y para analizarlos.

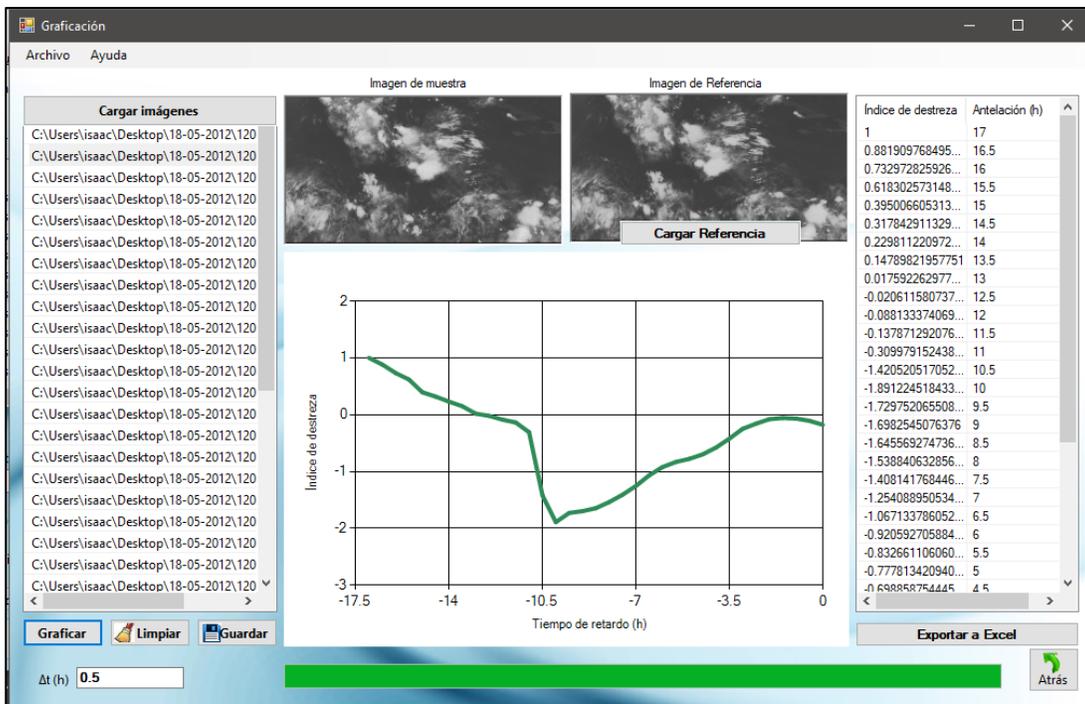


Figura 23. Ventana para cálculo de índice de destreza

El programa ahora cuenta con una página en internet que permite acceder al video de ayuda y al manual de usuario en caso de requerirse. Además, se puede obtener acceso al instalador del programa desde esta misma página. Esta funcionalidad está pensada en darle continuidad a la evolución del programa de modo que se encuentre accesible para el que lo necesite. Así mismo, la página se encuentra conectada a una cuenta de correo a la cual se le puede hacer llegar consultas o sugerencias que hagan terceros sobre el programa. Estos mensajes se pueden enviar directamente como correos electrónicos o por medio de una casilla habilitada para este fin en la misma página del programa. En el Apéndice 3 se puede observar la Figura 39, la cual muestra el apartado principal de la página web y que puede ser accesada desde el enlace <https://proimngsat.blogspot.com/>. En la Figura 40, Figura 41 y Figura 42, del Apéndice 3, se pueden observar las páginas de "información del programa", "ayuda y soporte" y "para descarga del programa", respectivamente.

Si ya se cuenta con el programa instalado y se tiene dudas acerca de cómo utilizarlo, se puede acceder a la sección de "ayuda y soporte" en la página de internet al hacer click en el botón de "Ayuda" que aparece en la parte superior izquierda del programa. Adicionalmente, posee un botón de archivo en el cual se encuentran funcionalidades básicas como "Abrir", "Guardar" y "Limpiar".

3.2 Análisis estadístico de imágenes

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de aplicar el cálculo de probabilidad para las diferentes distribuciones que se incorporaron al programa. Para efectos de que sea más fácil la visualización de los cambios en las imágenes, se escogieron porcentajes de probabilidad de 95%, 80%, 70% y 60% aunque en la práctica los porcentajes de probabilidad de interés rondarían del 85% o mayores. Este análisis se realizó para el compendio de imágenes del día 18 de mayo del 2012, las cuales son 35 imágenes con espaciamiento de 30 minutos entre cada una.

En la Figura 26 se muestran los resultados obtenidos para la distribución Generalizada de Valores Extremos en escala de grises; mientras que en la imagen Figura 25 se observan los resultados de aplicar la misma distribución, pero con la aplicación de color.

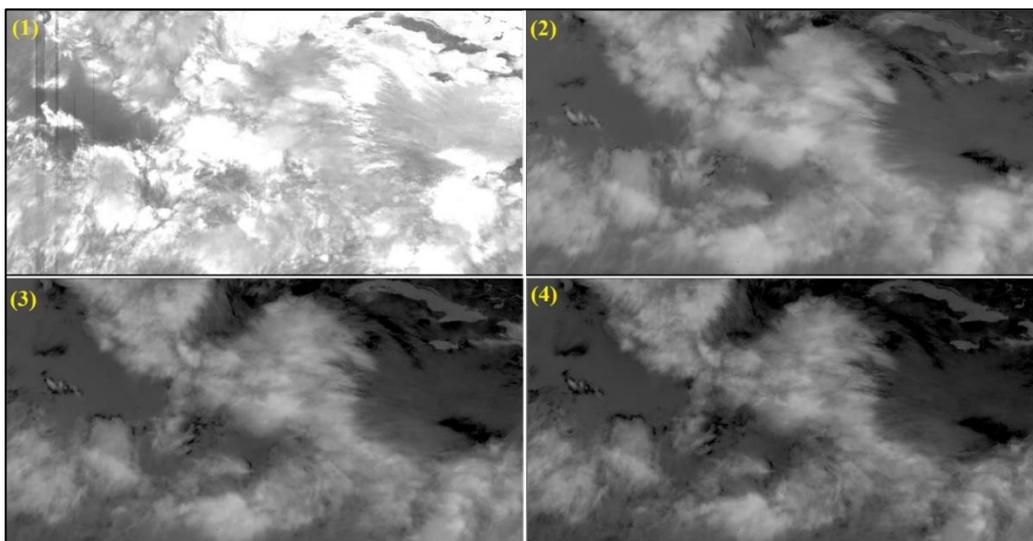


Figura 24. Análisis probabilístico del 18/05/2012 para la distribución Generalizada de Valores Extremos en escala de grises para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4)

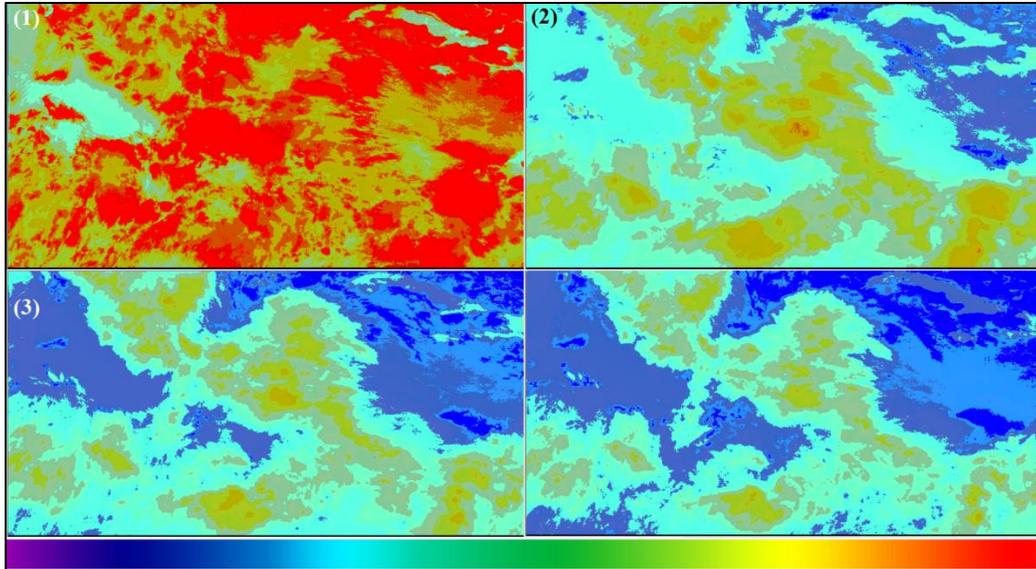


Figura 25. Análisis probabilístico 18/05/2012 para la distribución Generalizada de Valores Extremos con color para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4)

Por su parte, en la Figura 26 se muestran los resultados para la distribución Gumbel en escala de grises y en la Figura 27 se observan las imágenes a color para la misma distribución.

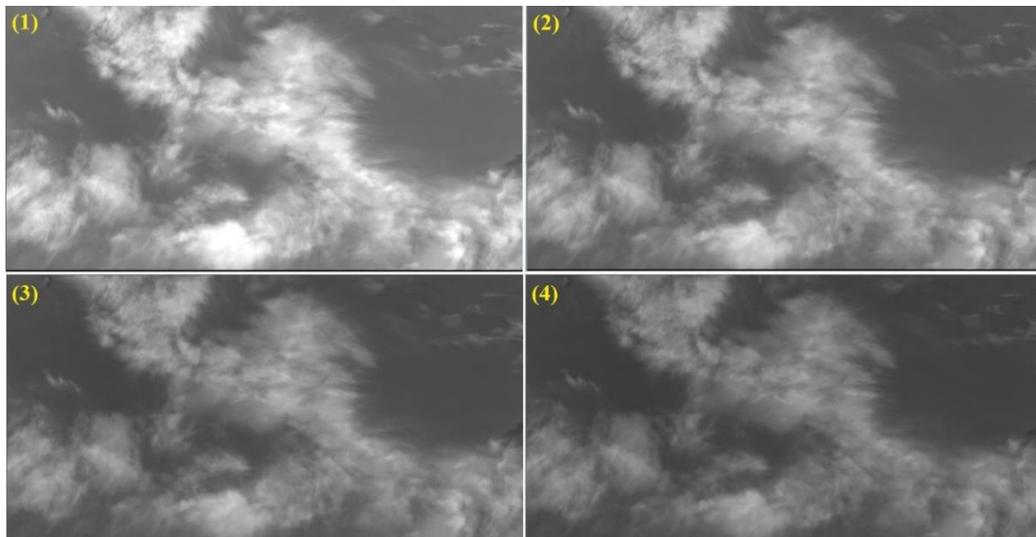


Figura 26. Análisis probabilístico del 18/05/2012 para la distribución Gumbel en escala de grises para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4)

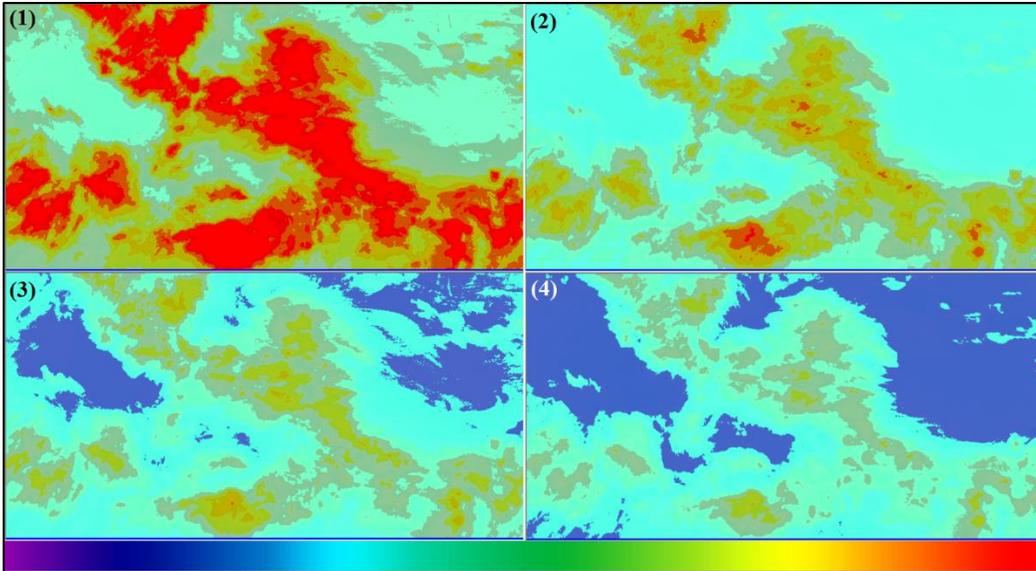


Figura 27. Análisis probabilístico del 18/05/2012 para la distribución Gumbel con color para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4)

En la Figura 28 se tienen las imágenes en escala de grises resultantes de aplicar el análisis probabilístico por medio de la distribución Exponencial y en la Figura 29 se tienen las imágenes de aplicar la distribución con el filtro de colores.

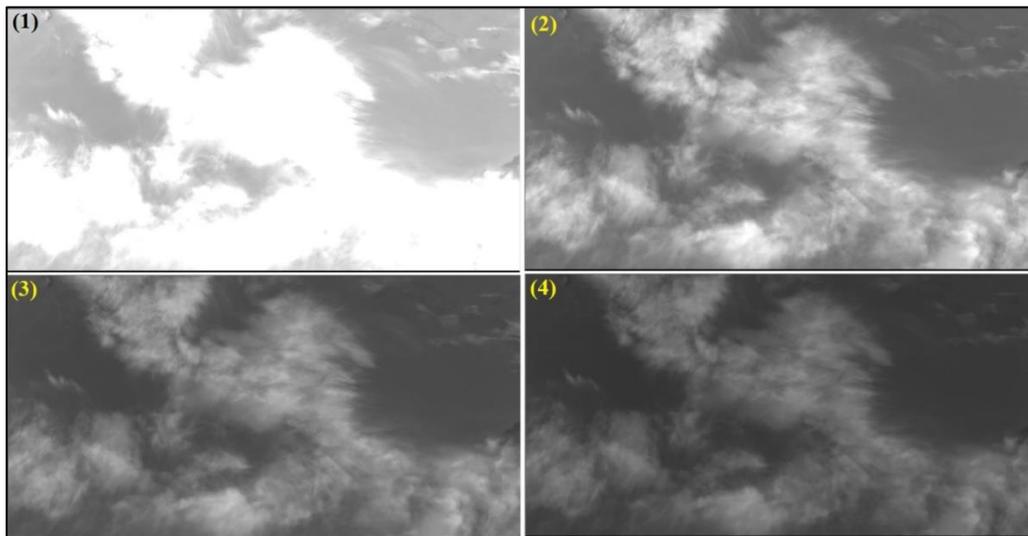


Figura 28. Análisis probabilístico del 18/05/2012 para la distribución Exponencial en escala de grises para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4)

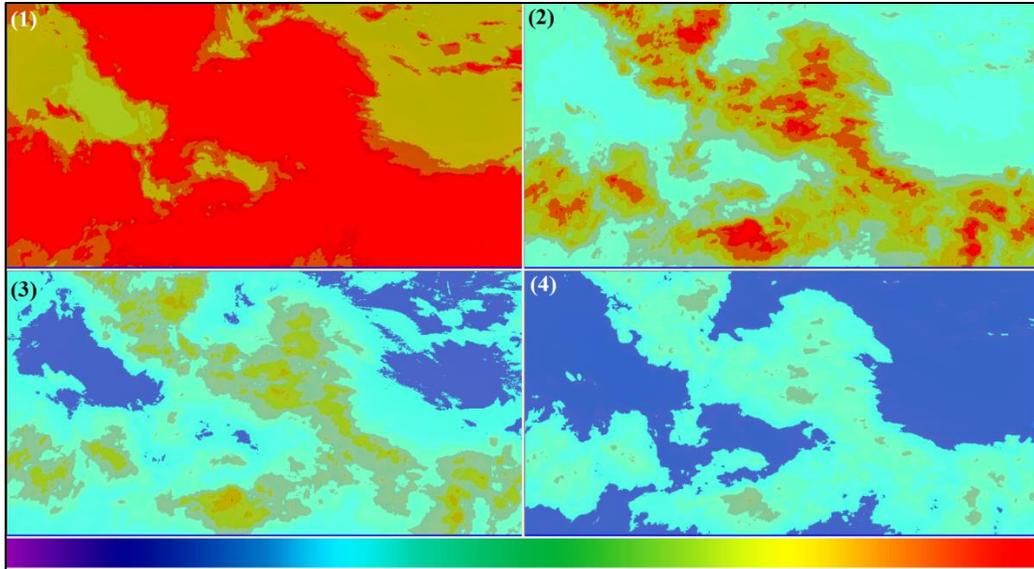


Figura 29. Análisis probabilístico del 18/05/2012 para la distribución Exponencial con color para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4)

Para el caso de la distribución Logística Generalizada, se tienen los resultados en escala de grises en la Figura 30, mientras que en la Figura 31 se tienen los resultados con mejoramiento con color.

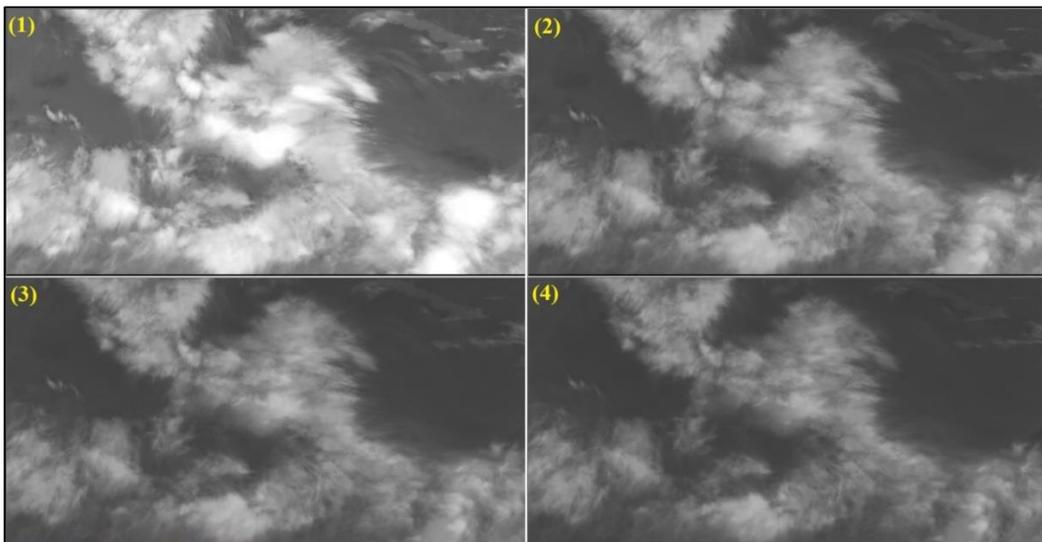


Figura 30. Análisis probabilístico del 18/05/2012 para la distribución Logística Generalizada en escala de grises para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4)

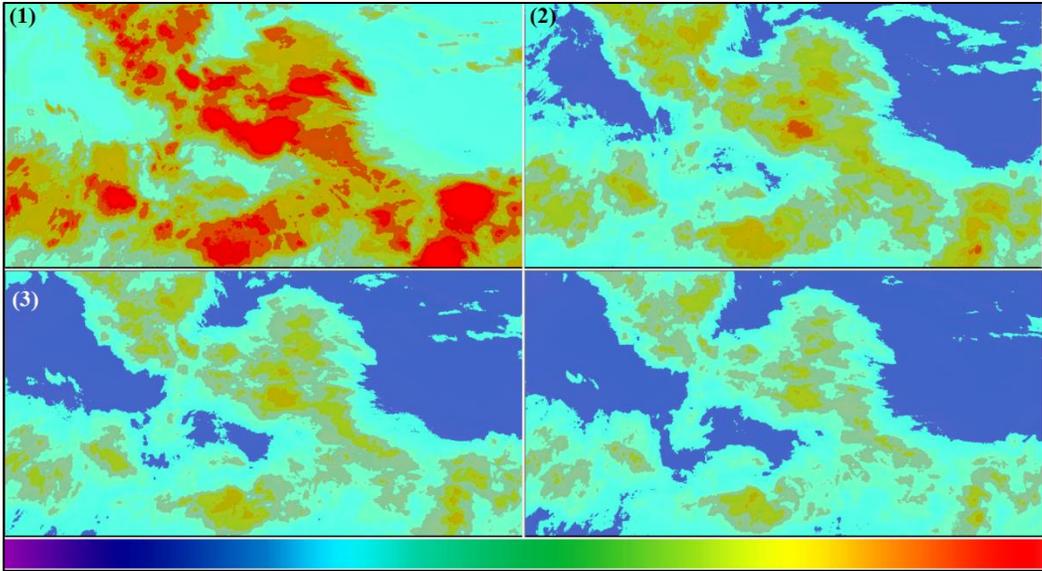


Figura 31. Análisis probabilístico del 18/05/2012 para la distribución Logística Generalizada con color para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4)

Finalmente, en la Figura 32 se observan los resultados en escala de grises para la distribución Generalizada de Pareto y en la Figura 33 los resultados para la misma distribución a color.

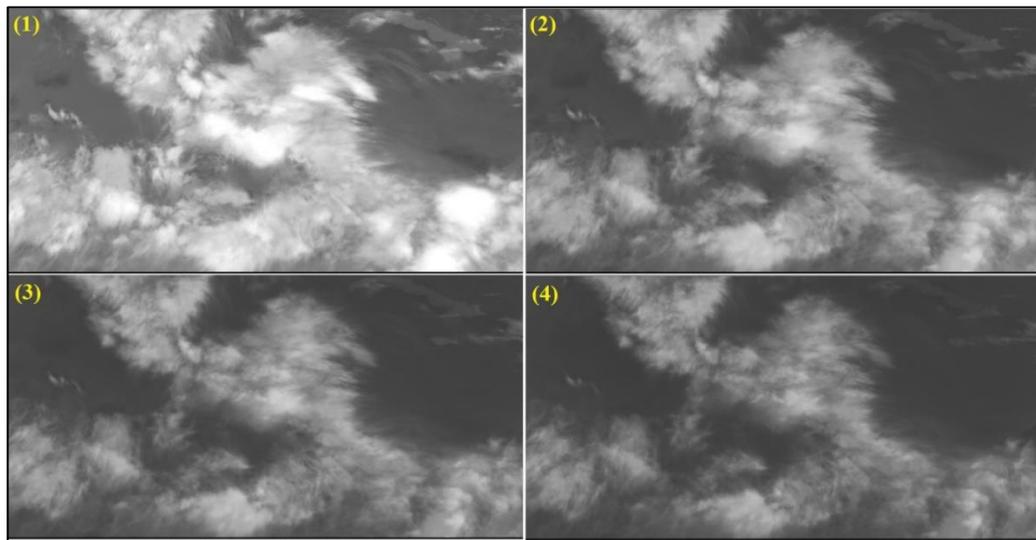


Figura 32. Análisis probabilístico del 18/05/2012 para la distribución Generalizada de Pareto en escala de grises para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4)

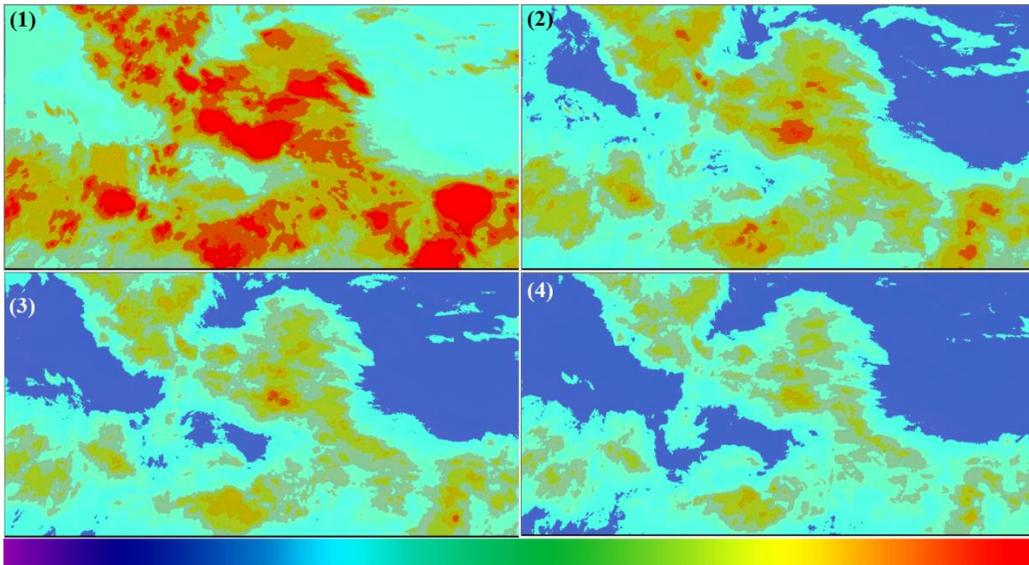


Figura 33. Análisis probabilístico del 18/05/2012 para la distribución Generalizada de Pareto con color para porcentajes de probabilidad de 95 (1), 80 (2), 70 (3) y 60 (4)

Debido a que realizar la comparación visual de las imágenes resulta ser relativamente complicado para las imágenes, en la Figura 34 se organizan las distribuciones programadas de acuerdo a la intensidad en los colores de los mapas generados para cada una de las probabilidades utilizadas.

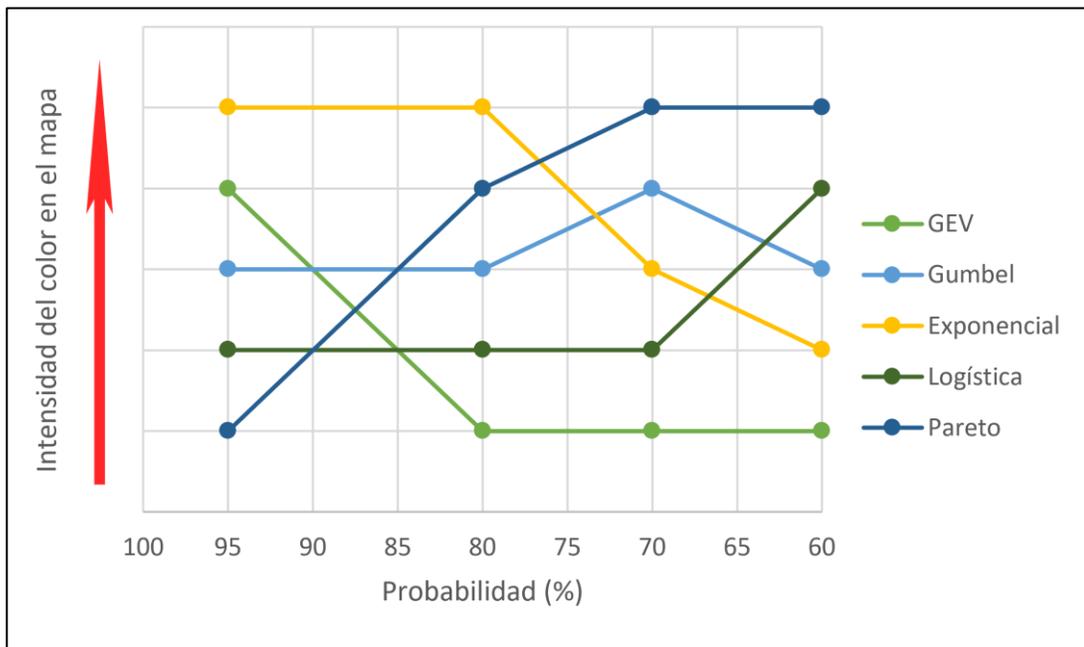


Figura 34. Comparativa de resultados de las imágenes generadas con diferentes porcentajes de probabilidad

3.3 Estimación de precipitación

En las Figura 35, Figura 36, Figura 37 y Figura 38 se muestran la comparación de imágenes satelitales para el cálculo de precipitación mediante los métodos de Arkin, NAW y Autoestimador. Estos resultados se aplicaron a imágenes de diferentes días y horas.

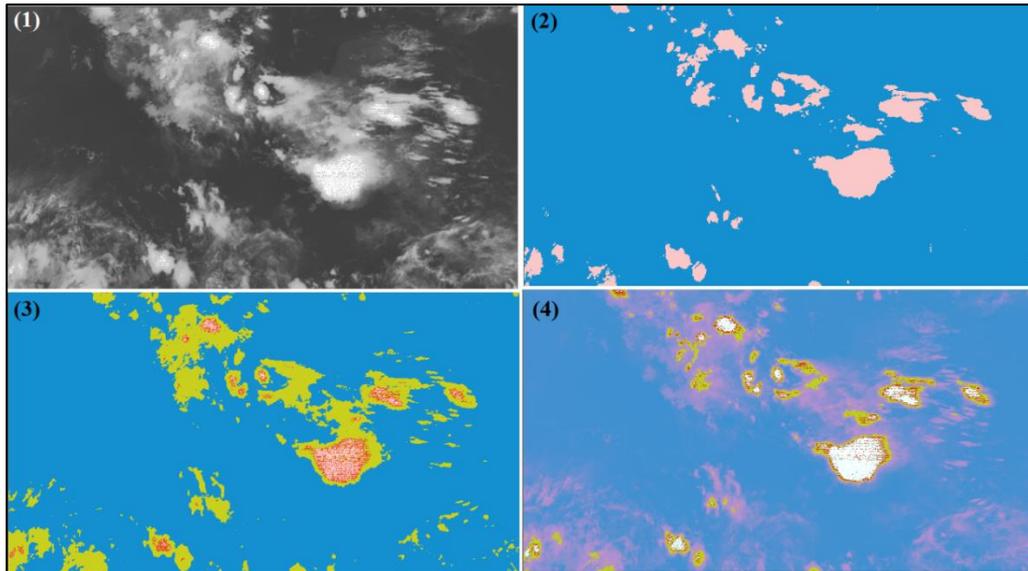


Figura 35. Precipitación del 18/05/2012 a las 5:15 am, imagen original (1), técnica de Arkin (2), NAW (3) y autoestimador (4)

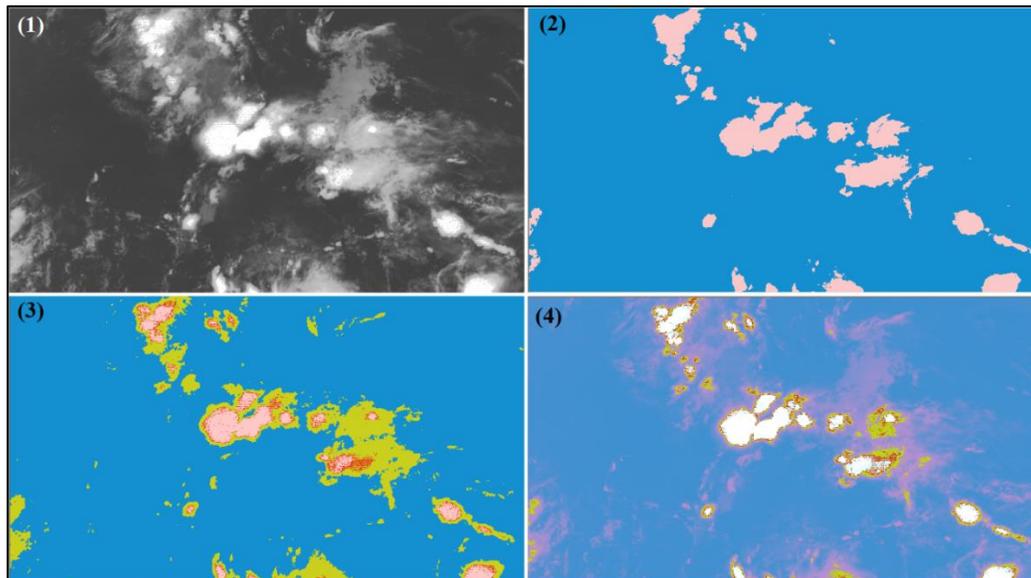


Figura 36. Precipitación del 19/05/2012 a las 6:15 am, imagen original (1), técnica de Arkin (2), NAW (3) y autoestimador (4)

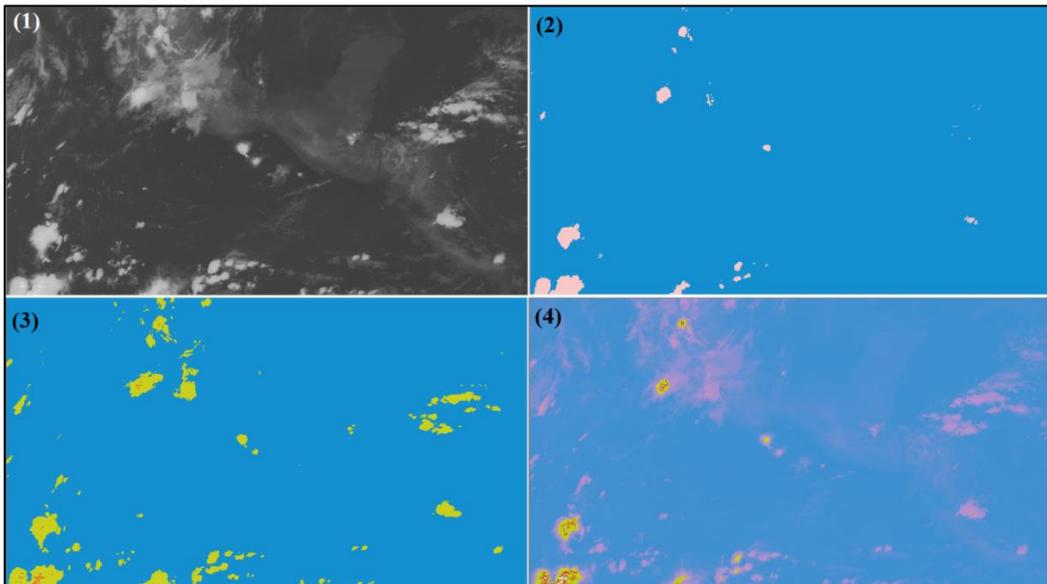


Figura 37. Precipitación del 26/07/2012 a las 11:45 am, imagen original (1), técnica de Arkin (2), NAW (3) y autoestimator (4)

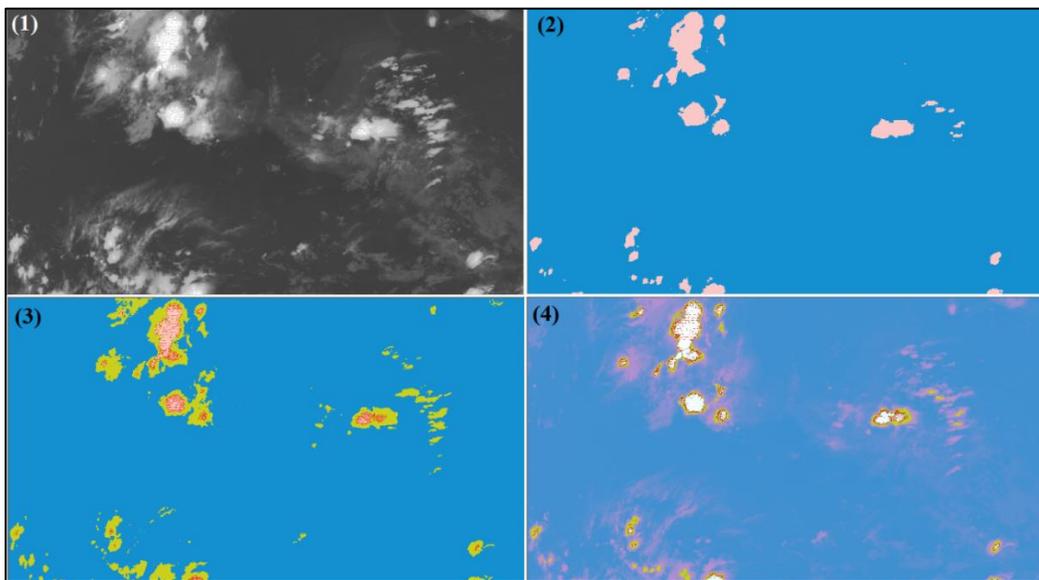


Figura 38. Precipitación del 27/07/2012 a las 4:45 am, imagen original (1), técnica de Arkin (2), NAW (3) y autoestimator (4)

4 Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

4.1.1 Desarrollo del programa

Se logró mejorar la apariencia del programa y la distribución de los elementos de las ventanas, lo que le facilita al usuario la utilización del programa. Esto resulta ser de suma importancia en el desarrollo de los programas actuales para que sean más atractivos, aunque no es el punto principal del proyecto.

Por otro lado, se mejoró la capacidad de análisis del programa al incorporar las distribuciones de probabilidad Logística, Exponencial y Pareto; además, se mejoraron las distribuciones Gumbel y GEV para el análisis estadístico de las imágenes satelitales. Por su parte, se corrigieron errores de código en los métodos de estimación de precipitación que impedían que funcionaran de manera adecuada y se actualizaron los límites utilizados para asignar precipitación en el método NAW.

Adicionalmente, se incorporaron botones y funcionalidades necesarias en las diferentes ventanas del programa y se depuró el código de errores que generaban que se dificultara el uso del mismo. En general, se realizó el control de excepciones del código para que este no se detenga inesperadamente.

La utilización de Visual Basic como lenguaje de programación resulta ser muy útil, puesto que se tiene una gran cantidad de información relacionada al lenguaje, lo que permite aprenderlo y familiarizarse con él fácilmente. Aunque un inconveniente es que, para poder tener acceso a la totalidad de las funcionalidades para programar, se necesita contar con un programa el cual es con licencia, a pesar de que hay una versión gratuita con funcionalidades limitadas.

4.1.2 Análisis estadístico de imágenes

El programa se realizó de modo que se puedan generar imágenes en escala de grises y a color, pero se puede observar que de manera general resulta más fácil analizar los mapas a color que las imágenes en escala de grises. Esto se debe a que las primeras permiten sectorizar las zonas del mapa y así poder distinguir diferencias en los píxeles al compararlas con su correspondiente en escalas de grises en las que no se notarían estas diferencias tan fácilmente.

Un ejemplo de esto se nota en los mapas en escalas de grises de la distribución Gumbel y Logística con probabilidad de 95% en las Figura 26 y Figura 30 donde la distribución logística presenta zonas muy brillantes que no se destacan de igual manera en la distribución Gumbel. Sin embargo, al observar los mapas con color en las Figura 27 y Figura 31 se puede concluir que la distribución Gumbel no presenta estos focos de brillo porque la imagen en general es más clara y produce que las zonas que se destacan en el mapa de la Figura 31 se vean opacadas.

Por otro lado, al observar los mapas de probabilidad generados se puede determinar que el programa asigna una menor probabilidad de ocurrencia de precipitación a los pixeles conforme se disminuye el porcentaje de probabilidad, lo que se puede notar en el cambio a tonos más oscuros en los mapas obtenidos en escalas de grises o a colores más fríos en el caso de los mapas con color para los casos de 95%, 80%, 70% y 60% respectivamente.

Adicionalmente, al observar el mapa resultante para un porcentaje de probabilidad determinado, y al compararla con las imágenes originales del satélite, se aprecia que aquellas zonas en las que no se tiene una presencia importante de nubes, los colores del mapa tienden a ser más fríos, mientras que para aquellas zonas en donde hay zonas de alta nubosidad, los colores resultantes tienden a ser más calientes. Esto da como conclusión que todas las distribuciones distinguen de manera correcta aquellas zonas con mayor nubosidad, y a partir de esta diferenciación se generan los mapas de probabilidad correspondientes con la probabilidad asignada, los cuales producen zonas similares como puntos focales de nubes con excepciones de las distribuciones de probabilidad GEV y Exponencial para el porcentaje de probabilidad de 95%.

Por su parte, al observar la Figura 34 se puede concluir que las distribuciones Logística y Gumbel corresponden a las distribuciones que dan resultados que tienden a presentar menor variación en su posición al compararlas con las demás distribuciones de probabilidad para los diferentes casos analizados. Cabe rescatar que la distribución Gumbel tiende a estar en el medio de los resultados obtenidos para cada uno de los porcentajes analizados con excepción del caso de 70%; mientras que la distribución Logística tiende a estar por debajo del valor medio con excepción del mapa obtenido para el caso de 60% de probabilidad.

Para el caso de 95% de probabilidad de las distribuciones GEV y Exponencial, que se presentan en las Figura 25 y Figura 29, se pueden observar que los mapas tienden a ser muy

rojos. Para el caso de la distribución GEV se concluye que esto puede ser generado por el hecho de que la distribución fue desarrollada para análisis de valores extremos, por lo que puede estar dando resultados sobreestimados para zonas en las que no se tendría, necesariamente, alta concentración nubosa. Por su parte, en el caso de la distribución exponencial se puede deber a la variación exponencial de la función, lo que produce que, para valores altos de probabilidad, la distribución tiende a sobrestimar los valores resultantes en comparación a las demás distribuciones de probabilidad del programa que presentan variaciones menos marcadas.

Adicionalmente, se concluye que las distribuciones de probabilidad GEV y Exponencial dan los resultados más bajos conforme se disminuye el porcentaje de probabilidad en comparación a las demás distribuciones. Sin embargo, la distribución GEV es la que presenta el descenso más rápido al disminuir la probabilidad en el cálculo. Por otro lado, la distribución de Pareto es la que tiene los valores más bajos al utilizar porcentajes de probabilidad altos, pero sus resultados tienden a ser más altos para los casos de probabilidades de 60% y 70%.

4.1.3 Estimación de precipitación

Para los métodos de estimación de precipitación, se puede concluir que las tres técnicas con las que cuenta el programa realizan una discriminación de los píxeles que podrían generar precipitación de aquellos que no. Sin embargo, la técnica de Arkin resulta ser bastante básica, y la técnica de autoestimador es la que permite obtener valores más detallados por píxel.

Adicionalmente, al observar las Figura 35, Figura 36, Figura 37 y Figura 38 se puede observar que el cambio de los colores de los mapas permite poder distinguir más fácilmente las diferentes zonas precipitables, de modo que los colores más claros son zonas con un valor de precipitación más alto.

Finalmente, se necesita realizar una calibración de la técnica de autoestimador para valores de precipitación nacionales, puesto que la técnica está desarrollada para los valores de precipitación en Estados Unidos, pero por falta de tiempo no se logró ahondar en este análisis.

4.2 Recomendaciones

Para continuar con el desarrollo del programa se recomienda la revisión del código para poder determinar la posible existencia de errores que se hayan omitido, o secciones de código

que se puedan mejorar. Esto lleva a varios puntos de consideración en el programa, los cuales se exponen a continuación:

Se recomienda la revisión de las distribuciones Exponencial y GEV para poder determinar la razón concreta por la que el resultado de los mapas de probabilidades de 95% son tan diferentes en comparación a las demás distribuciones incluidas en el programa. Así, se podría considerar si se pueden corregir o determinar las condiciones necesarias que se deben cumplir para utilizar estas distribuciones de manera correcta.

En relación a la distribución GEV, actualmente, el algoritmo implementado toma mucho tiempo para el cálculo de los mapas de probabilidad. Este efecto se debe al método utilizado para calcular la función Gamma en la distribución. Por tal motivo, se recomienda considerar la optimización de este algoritmo para poder tener una reducción en el tiempo de cálculo, puesto que una de las principales consideraciones para el desarrollo del programa es la obtención de información representativa de manera rápida.

Adicionalmente, se recomienda la revisión de los demás apartados del programa como las técnicas de precipitación, comparado de imágenes, cálculo de índice de destreza y aplicación de filtros para poder determinar si existen detalles a mejorar en los métodos, o en cuanto a funcionalidad de las ventanas.

Además, se recomienda iniciar con el desarrollo bases de datos de referencia para poder realizar un proceso de calibración del programa. Es necesario obtener datos relacionados a eventos importantes que se hayan dado en zonas específicas o a nivel nacional como, por ejemplo, los huracanes Nate y Otto. Así mismo, se debe realizar la correlación correspondiente entre las imágenes satelitales y los datos medidos en tierra para poder comparar los valores que está generando el programa y la desviación que poseen con los datos medidos con el fin aplicar los ajustes necesarios en el programa y poder estimar con un buen grado de precisión la evolución de cuerpos nubosos y a su vez poder desarrollar metodologías de alerta temprana que sean adecuadas a los resultados obtenidos.

Adicionalmente, a pesar de que se intentó conseguir nuevos registros de imágenes satelitales, no se obtuvo respuesta por parte de la NASA ni la NOAA. Esto produjo que se trabajara con las imágenes que había logrado obtener Aguirre (2012). Por tal motivo, se recomienda buscar nuevas imágenes y realizar el análisis correspondiente para poder

incorporarlas en el programa, pues actualmente el satélite que se utilizó para generar las imágenes del registro que se tiene ya no está en funcionamiento. Adicionalmente, la tecnología se ha actualizado y esto produce que se tengan que considerar desarrollar correlaciones de las imágenes actuales entre la temperatura de brillo de la parte superior de la nube y el canal que se decida usar para poder realizar los análisis.

En relación a la generación de base de datos, el Climate Hazards Center tiene registros de precipitaciones a nivel global en la cual se tienen mediciones desde 1999 en la base Chrips. Es necesario hacer una revisión de estas estimaciones de precipitaciones para la zona de Costa Rica para poder obtener información de precipitación y determinar si los datos que se tienen en esta base son de utilidad para los objetivos del proyecto de futuros trabajos. Además, podrían representar un parámetro para poder calibrar el programa si se ajustan a los objetivos.

Un punto muy importante es la calibración de las técnicas implementadas en el programa para el sector del país, pues actualmente se encuentran calibradas para zonas de Estados Unidos. En relación a las técnicas de estimación de precipitación se les debe dar especial interés pues las precipitaciones en la zona ecuatorial son muy distintas a las precipitaciones en sectores más al norte del globo. Adicionalmente, posterior al proceso de calibración se recomienda realizar una verificación de esta para poder comprobar que los ajustes aplicados son correctos.

Adicionalmente, se recomienda continuar con el desarrollo de las ventanas para comparación de imágenes satelitales y de índice de destreza; que por motivo de tiempo no se pudieron considerar en el presente proyecto. Lo anterior se debe que son una gran herramienta para prevención de desastres y desarrollo de metodologías de alerta temprana para el país, debido a la rápida respuesta de las cuencas hidrográficas.

Por otro lado, tomando en cuenta la vida útil de los satélites, sería oportuno incorporar una opción que permita seleccionar el satélite fuente de las imágenes que se vayan a utilizar para el análisis; además, del canal que se esté utilizando para el mismo, lo que ampliaría la capacidad del programa. Lo anterior se debe a que actualmente se generan imágenes en diferentes amplitudes de onda del rango infrarrojo, por lo que dependiendo de la amplitud de la onda puede que la imagen sea más representativa o podría aportar información adicional.

Por su parte, en este momento el programa permite realizar la exportación de los mapas en diversos formatos de imagen, pero se recomienda incorporar la opción de poder exportarlos en formato ráster para poder utilizar los datos generados en otros programas o sistemas de información geográfica en análisis más profundos y detallados.

Adicionalmente, la NOAA desarrolló un método que es una variante del método Autoestimador, el cual se conoce como Hidro-estimador, y que podría ser un gran aporte al programa si se lograra incorporar. Lo que lleva a la recomendación de realizar un análisis para determinar si el uso de imágenes satelitales en rango infrarrojo es suficiente para poder realizar cálculos de precipitación, o si es necesario considerar la adición de parámetros adicionales al análisis como velocidades de viento en la zona de estudio o registros de precipitación previos.

Finalmente, se recomienda mantener actualizada la página web que se generó para el programa para facilitar el acceso al instalador del programa e información adicional referente al programa. Además, en este momento esta página se encuentra asociada a una cuenta de Google como modo demostrativo, pero sería oportuno poder migrar la página a la propia red de la Universidad de Costa Rica para tener control de los archivos y actualizaciones que se hagan posteriormente. Así mismo, en el programa, en el apartado de ayuda se tiene acceso directo a la página web en caso de ser necesario acceder al manual de usuario o videos de ejemplo de uso de las diferentes ventanas.

5 Fuentes bibliográficas

- Aguirre, K. (2012). Desarrollo de un programa de cómputo para el análisis de imágenes de satélite con fines de predicción hidrológica. Trabajo de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Alberola, A. (2013). *Clima, naturaleza y desastre. España e Hispanoamérica durante la Edad Moderna*. Valencia: Publicaciones Universidad de Valencia.
- Anchía, L. (2001). Caracterización del sistema nuboso de la cuenca del Río Turrialba mediante el uso de imágenes de satélite. Proyecto para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Benigno, E. (2016). Evaluación de imágenes satelitales de precipitaciones GPM (Global Precipitation Measurement) a escala mensual para el Azuay. Proyecto para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Bunge, V. & Valek, G. (2001). Satélites artificiales: ampliación de nuestras fronteras. ¿Cómo ves?, 30, Artículo 32. Extraído el 1 de mayo, 2019, de http://www.comoves.unam.mx/assets/revista/32/guiadelmaestro_32.pdf
- Campozano, L., Ballari, D., & Céleri, R. (2016). Imágenes TRMM para identificar patrones de precipitación e índices ENSO en Ecuador. *Maskana*, 5, 185-191. Extraído el 3 de mayo, 2019, de <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/566>
- Castillo, S. & Salazar, C. (2018). *Fundamentos básicos de estadística*. Quito: sin editorial.
- Chow, V.T., Maidment, D. & Mays, L. (1994). Hidrología aplicada: McGraw-Hill.
- Chuvieco, E. (2000). Fundamentos de teledetección espacial. RIALP, 568 pp.

- Davis, G. (2011). NOAA Satellite and Information Service: *History of the NOAA Satellite Program*. PDF Historia de los Satélites Goes. Extraído el 28 de abril, 2019, de https://goes.gsfc.nasa.gov/text/history/History_NOAA_Satellites.pdf
- Dimov, S. (2019). *Global satellite meteorological observation (GSMO) applications*. Durban: Springer Nature Switzerland.
- Eslava, J. (2011). Análisis regional de las precipitaciones diarias extremas en la cuenca del río arga con R. Proyecto para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrónoma.
- Gómez, E., Obregón, N. & Rocha, D. (2013). Métodos de segmentación de nubes en imágenes satelitales. *Tecnura*, 17(36), 96-110.
- Greenwood, J., Maciunas, J., Matalas, N. & Wallis, R. (1979). Probability Weighted Moments: Definition and Relation to Parameters of Several Distributions Expressable in Inverse Form. *Water Resources Research*, 15(5), 1049-1054.
- Hobouchian, M., et al. (2017). Validación de la estimación de la precipitación por satélite aplicando la técnica hidroestimador. *Meteorológica*, 42(1), 19-37.
- Hosking, J. & Wallis, J. (1997). Regional Frequency Analysis: An approach based on L-moments. Cambridge University Press, 224 pp.
- Huidobro, J. (2007). Cincuentenario del Sputnik 1. Colegio de ingenieros de telecomunicaciones. Extraído el 30 de abril, 2019, de <http://coit.es/publicaciones/bit-bit165/110-112.pdf>
- Khaki, M. (2020). *Satellite remote sensing in hydrological data assimilation*. Australia: Springer.
- Kinoti, J., Zhongbo, S., Tsaehai, W., Ben, M. (2009). Estimation of spatial-temporal rainfall distribution using remote sensing techniques: A case study of Makanya catchmente, Tanzania [Versión electrónica]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 12S (2019) S90-S99.

- León, F. & Quirantes, J. (2004). *Meteorología y Climatología, Unidad Didáctica*. Fundación Española para la Ciencia y Tecnología. Extraído el 29 de abril, 2019, de <https://docplayer.es/4718724-Observacion-e-identificacion-de-nubes.html>
- López, L. (2002). La predicción del tiempo a partir de modelos numéricos. *Meteorología Colombiana*, 1(6), 13-20.
- Luque, A. & Amengual, B., (2007). *Teledetección: Aplicaciones meteorológicas*. Universitat de les Illes Balears. Extraído el 25 de abril, 2019, de <http://www.uib.es/depart/dfs/-meteorologia/Web-grup/teledeteccio/SIG/APLI-dMason>
- Martín, L. (1998). El uso e interpretación de imágenes de satélite en las labores de predicción. TETYS, Revista de Meteorología, 1. Extraído el 1 de mayo, 2019, de <http://www.tethys.cat/antics/num01/articles/art0105esp.htm>
- Menzel, W. (2006). *Remote sensing applications with meteorological satellites*. Estados Unidos: NOAA Satellite and Information Service.
- Molina, G. (2010). Teoría de valores extremos aplicada a la gestión de riesgos en inundaciones. Proyecto de graduación para optar por el título de Licenciatura en Matemáticas, División de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Sonora, Sonora, México.
- Mondini, A. et al. (2010). Semi-automatic recognition and mapping of rainfall induced shallow landslides using optical satellite images [Versión electrónica]. *Remote Sensing of Environment*, 115 (2019) 1743-1757.
- Montgomery, D. & Runger, G. (2003). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. New York: John Willey & Sons, Inc.
- Naranjo, R. (2011). Análisis regional de frecuencia mediante el método de los L-momentos en las regiones de Valparaíso y Metropolitana para la generación de cartografía probabilística de sequía meteorológica. Proyecto de graduación para optar por el grado

de Licenciatura en Ingeniería Agrónoma, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Chile.

Nasrollahi, N. (2013). Improving Infrared-Based Precipitation Retrieval Algorithms Using Multi-Spectral Satellite Imagery. Proyecto de graduación para optar por el grado de Doctorado en Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de California, Estados Unidos.

Negri, A. & Adler, R. (1993). An Intercomparison of Three Satellite Infrared Rainfall Techniques over Japan and Surrounding Waters [Versión Electrónica]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 32(2), 357-373.

Nimbus Weather Service. (2005). Los satélites meteorológicos (cap. 12). Extraído el 1 de mayo, 2019, de <http://200.58.146.28/nimbus/weather/pdf/cap12.pdf>

NOAA & NASA (2017). GOES-R Series ground system. Extraído el 29 de octubre, 2020 del sitio Web de GOES-R: https://www.goes-r.gov/education/docs/Factsheet_GS.pdf

NOAA & NASA (2016). GOES-R Series: NOAA's most advanced geostationary weather satellites. Extraído el 30 de octubre, 2020 del sitio Web de GOES-R: https://www.goes-r.gov/education/docs/GOES-R_Overview_FS_FINAL.pdf

NOAA & NASA. GOES-R Series instruments overview. Extraído el 29 de octubre, 2020 del sitio Web de GOES-R: <https://www.goes-r.gov/spacesegment/instruments.html>

Pratt, T. & Allnutt, J. (2020). *Satellite communications* (3^{era} ed. en inglés). Chichester: John Wiley and Sons LTD.

Rogers, R. (2003). *La física de las nubes* (1^{era} ed. En español). Madrid: Editorial Reverté, S.A.

Serway, R. & Jewett, J. (2008). *Física para ciencias e ingeniería* (7^{ma} ed. en español). CENGAGE Learning.

- Schmit, T., et al. (2017). Close look on the ABI on the GOES-R series. *Bulletin of the American Meteorology Society*, 98(8), 681-698.
- Simon, I. (1968). *Radiación Infrarroja*. Mexico D.F.: Editorial Reverte Mexicana S.A.
- Tarruella, R. & Jorge, J. (2001). Estimación de lluvias solo con imágenes infrarrojas. Comparativa entre versiones originales. *Teledetección, medio ambiente y cambio global*, 388-391.
- Terán, A., Carbajal, G. & Rosales, E. (2002, setiembre). Calibración e implementación de las imágenes infrarrojas del satélite GOES-8 para la detección de incendios forestales y actividad volcánica. En: Séptimo Congreso Nacional de Meteorología. Organización Mexicana de Meteorólogos, México.
- Trenberth & Stepaniak. (2001). Indices of El Niño Evolution. *Journal of Climate*, 14(8), 1967-1701.
- Vicente, G., Scofield, R. & Menzel, W. (1998). The Operational GOES Infrared Rainfall Estimation Technique. *American Meteorological Society*, 79(9), 1883-1898.
- Walpole, R., Myers, R., Myers, S & Ye, K. (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. (9^{na} ed. En español). México: PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA S.A.
- Wilks, D. (2019). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. (4^{ta} ed. En inglés). Estados Unidos, Massachusetts: Editorial Elsevier Inc.
- Wilson, J., Buffa, A. & Lou, B. (2007). *Física*. México D.F.: Pearson Educación.
- Woodley, W. & Sancho, B. (1971). A First Step Towards Rainfall Estimation from Satellite Cloud Photographs. *Weather*, 26(7), 279-289.
- World Meteorological Organization. (2009). *Análisis de los valores extremos* [Versión electrónica]. Guía de prácticas hidrológicas 168(2), Capítulo 5.

World Meteorological Organization. (2017). International Cloud Atlas. Extraído el 16 setiembre, 2020 del sitio Web de WMO: <https://cloudatlas.wmo.int/en/home.html>

Zou, X. (2020). *Atmospheric satellites observations: variation assimilation and quality assurance*. Maryland: Elsevier.

6 Apéndices

6.1 Instalador, código y manual de usuario Pro-imgSAT

6.2 Clasificación de nubes

El siguiente cuadro tiene como fin permitir una mejor visualización de la clasificación de las nubes y la asociación de los géneros con las especies, variedades y características complementarias; así como las nubes accesorio más frecuentes para cada género.

Cuadro 4. Resumen de clasificación de nubes

Género	Especies	Variedades	Características complementarias	Nubes accesorio	Nubes madre y nubes especiales	
					Genitus	Mutatus
Cirrus	fibratus uncinus spissatus castellanus floccus	intortus radiatus vertebratus duplicatus	mamma fluctus	-	cirrocumulus altocumulus cumulonimbus homo	cirrostratus homo
Cirrocumulus	stratiformis lenticularis castellanus floccus	undulatus lacunosus	virga mamma cavum	-	-	cirrus cirrostratus altocumulus homo
Cirrostratus	fibratus nebulosus	duplicatus undulatus	-	-	cirrocumulus cumulonimbus	cirros currocumulus altostratus homo
Altostratus	stratiformis lenticularis castellanus floccus volutus	translucidus perlucidus opacus duplicatus undulatus radiatus lacunosus	virga mamma cavum fluctus asperitas	-	cumulus cumulonimbus	cirrocumulus silostratus nimbostratus stratocumulus
Altostratus	-	traslucidus opacus duplicatus ondulatus radiatus	virga praecipitatio mamma	pannus	cltocumulus cumulonimbus	cirrostratus nimbostratus
Nimbostratus	-	-	praecipitatio virga	pannus	cumulus cumulonimbus	altocumulus altostratus stratocumulus
Stratocumulus	stratiformis lenticularis castellanus floccus volutus	translucidus perlucidus opacus duplicatus undulatus radiatus lacunosus	virga mamma praecipitatio fluctus asperitas cavum	-	altostratus nimbostratus cumulus cumulonimbus	altocumulus nimbostratus stratos

Género	Especies	Variedades	Características complementarias	Nubes accesorio	Nubes madre y nubes especiales	
					Genitus	Mutatus
Stratus	nebulosus fractus	opacus traslucidus undulatus	praecipitatio fluctus		nimbostratus cumulus cumulonimbus homo silva cataracta	stratocumulus
Cumulus	humilis mediocris congestus fractus	radiatus	virga praecipitatio arcus fluctus tuba	pileus velum pannus	altocumulus stratocumulus flamma homo cataracta	stratocumulus stratus
Cumulonimbus	calvus capillatus	-	praecipitatio virga incus mamma arcus murus cauda tuba	pannus pileus velum flumen	altocumulus altostratus nimbostratus stratocumulus cumulus flamma homo	cumulus

Fuente: World Meteorological Organization (2017). International cloud atlas.

6.3 Lista de satélites geoestacionarios

En el siguiente cuadro se muestran los satélites geoestacionarios que han sido puestos en órbita por Estados Unidos, Japón, China y Europa como guía para poder identificar de manera más simple los satélites que actualmente pueden brindar información de relevancia. A la par del nombre de cada satélite se encuentra el estado de funcionamiento de cada uno, para aquellos que no se encuentren inactivos actualmente.

Cuadro 5. Lista de satélites meteorológicos geoestacionarios

País	Generación	Nombre	Año de lanzamiento	Latitud
Estados Unidos	0	GOES-1, -3	1975, 1978	135° O
		GOES-2	1977	75° O
	Primera	GOES-4, -6	1980, 1983	135° O
		GOES-5, -7	1981, 1987	75° O
	Segunda	GOES-8, -12	1994, 2001	75° O
		GOES-9, -10, -11	1995, 1997, 2000	135° O
	Tercera	GOES-13 (operacional)	2006	75° O
		GOES-14 (en espera)	2009	105° O
		GOES-15 (operacional)	2010	135° O
	Cuarta	GOES-16 (en misión)	2016	89,5° O
Europa	Primera	Meteosat-1, -2, ..., -7	1977, 1981, 1989, 1991, 1993, 1997	0°
	Segunda	Meteosat-8	2002	3.7° E
		Meteosat-9 (operacional)	2005	9.5° E
		Meteosat-10 (operacional)	2012	0°
		Meteosat-11 (en espera)	2015	3.4° O
Japón	Primera	GMS-1, -2, ..., -5	1977, 1981, 1984, 1989, 1995	140° E
	Segunda	MTSAT-1R	2005	140° E
		MTSAT-2 (en espera)	2006	145° E
	Tercera	Himawari-8 (operacional)	2014	140.7° E
		Himawari-9 (en espera)	2016	140.7° E
China	Primera	FY-2A, -2B, -2C	1997, 2000, 2004	105° E
		FY-2D	2006	86.5° E
		FY-2E (Operacional)	2008	86.5° E
		FY-2F (en espera)	2012	112.5° E
		FY-2G (operacional)	2014	105° E
		FY-2H (estado indefinido)	2018	-
	Segunda	FY-4A (en misión)	2016	99.5° E

Fuente: Zou, X., 2020.

Editado por: Zamora, 2021.

6.4 Página de internet del programa Pro-imgSAT

En las siguientes Figuras se muestra la apariencia que posee actualmente la página de internet en la cual se tiene acceso a la información del programa.

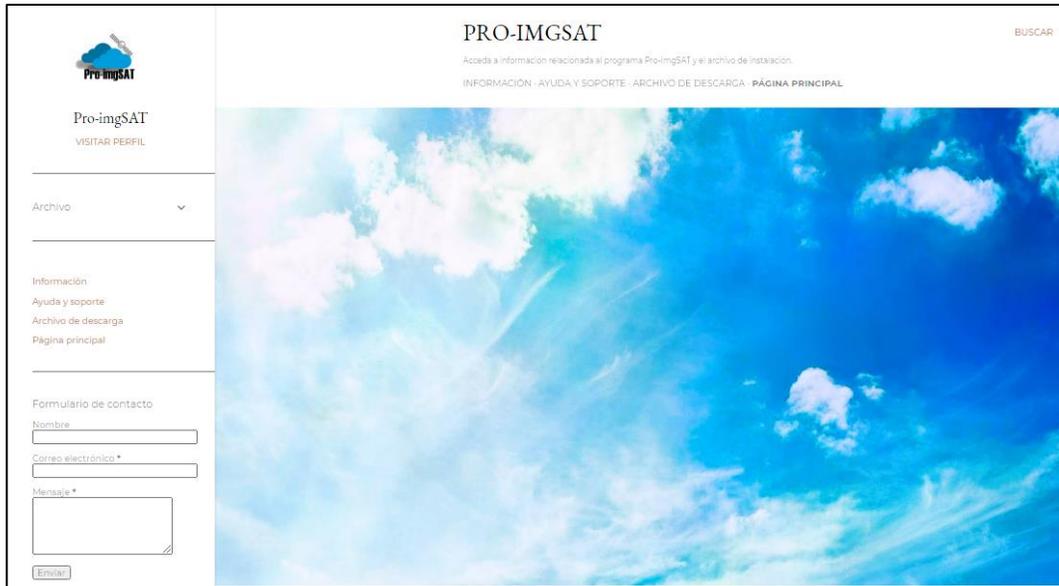


Figura 39. Ventana principal de la página del programa



Figura 40. Página de información del programa

PRO-IMGSAT BUSCAR

Acceda a información relacionada al programa Pro-ImgSAT y el archivo de instalación.

INFORMACIÓN · **AYUDA Y SOPORTE** · ARCHIVO DE DESCARGA · PÁGINA PRINCIPAL

Publicado por Pro-ImgSAT

AYUDA Y SOPORTE

—

En esta ventana se puede obtener acceso al Manual de Usuario y un video introductorio de uso del programa.

- Video introductorio al uso del programa



- Manual de usuario del programa

Manual de Usuario Pro-ImgSAT

Para mayor soporte se pueden comunicar al correo: ayuda.proimgsat@gmail.com

Figura 41. Página de ayuda y soporte

PRO-IMGSAT BUSCAR

Acceda a información relacionada al programa Pro-ImgSAT y el archivo de instalación.

INFORMACIÓN · AYUDA Y SOPORTE · **ARCHIVO DE DESCARGA** · PÁGINA PRINCIPAL

Publicado por Pro-ImgSAT

ARCHIVO DE DESCARGA

—

Instalador	Versión
Paquete Pro-ImgSAT	2.0.1.0

Figura 42. Página para descarga del programa