



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ciencias Físicas

Escuela Profesional de Física

**Análisis de la evolución espacio-temporal de un Complejo
Convectivo de Mesoescala sobre la Amazonía peruana usando
imágenes GOES-13**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

Jean Deyby TURIN ROBLES

ASESOR

Dr. David PAREJA QUISPE

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Turin, J. (2026). *Análisis de la evolución espacio-temporal de un Complejo Convectivo de Mesoescala sobre la Amazonía peruana usando imágenes GOES-13*. [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Física]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Jean Deyby Turin Robles.
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	72911776
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0004-4985-9163
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Dr. David Pareja Quispe
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	41273620
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-6904-3736
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Mg. Octavio Fashé Raymundo
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10351868
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Fernando Mestanza Hernández
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06585518
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Mg. Melchor Nicolas Llosa Demartini
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07266845

Datos de investigación	
Línea de investigación	A.2.3.1. Procesamiento de datos Satelitales y Modelado
Grupo de investigación	Grupo de investigación en ciencias de la tierra, clima y medio ambiente-ctclima
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Junin Provincia: Huancayo Distrito: Saño Latitud: -11.95479774905361 Longitud: -75.25287904430574
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Obligatorio. Ejemplo: Enero 2026 - mayo 2026
URL de disciplinas OCDE	Investigación climática https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.10 Ciencias del medio ambiente https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decano de América
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA
OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA**

Siendo las 09:20 horas del sábado 27 de junio de 2026, en el Salón de Grados de la Facultad de Ciencias Físicas (Auditorio 109), bajo la Presidencia del Mg. Octavio Fashé Raymundo (Presidente), Lic. Fernando Mestanza Hernández (Miembro Titular), Dr. David Pareja Quispe (Asesor) y el Mg. Melchor Nicolas Llosa Demartini (Miembro Suplente), se dio inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Trabajo de Suficiencia Profesional para optar el Título Profesional de Licenciado en Física (según Art. 45.2 de la Ley N° 30220), del bachiller:

JEAN DEYBY, TURIN ROBLES

Dando lectura al Resumen del Expediente, el Presidente del Jurado, invitó al bachiller Jean Deyby, Turin Robles a realizar su exposición del Trabajo de Suficiencia Profesional titulado: *"Análisis de la evolución espacio-temporal de un Complejo Convectivo de Mesoescala sobre la Amazonía peruana usando imágenes GOES-13"*.

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente, invitó al bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, el Mg. Octavio Fashé Raymundo invitó al candidato y al público a pasar a la Sala de Sesión, para dar lectura al resultado de la deliberación. Ha obtenido la calificación de:

18
(NÚMERO)

Pieciocco
(LETRAS)

Con Honores
(MENCIÓN)

Finalmente, el presidente del Jurado, propone al consejo de la Facultad que se le declare Licenciado en Física al bachiller Jean Deyby, Turin Robles Siendo las 9:35 horas, se levanta la sesión.

Mg. Octavio Fashé Raymundo
Presidente

Ing. Fernando Mestanza Hernández
Miembro Titular

Dr. David Pareja Quispe
Asesor

Mg. Melchor Nicolas Llosa Demartini
Miembro Suplente



Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, David Pareja Quispe en mi condición de asesor acreditado mediante el Acuerdo del Comité de Gestión N° 024-EPF-FCF-26 del Trabajo de suficiencia profesional, cuyo título es **“Análisis de la evolución espacio-temporal de un Complejo Convectivo de Mesoescala sobre la Amazonía peruana usando imágenes GOES-13”**, presentado por el bachiller Jean Deyby Turin Robles para optar el Título Profesional de Licenciado en Física, **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 2% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del Título Profesional de Licenciado en Física.

Lima, 07 de octubre de 2026

Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del asesor: Dr. David Pareja Quispe

DNI: 41273620

RESUMEN

El presente estudio analiza la evolución espacio-temporal de un Complejo Convectivo de Mesoescala (CCM) desarrollado sobre la Amazonía peruana mediante el uso de imágenes satelitales en el infrarrojo térmico del satélite geoestacionario GOES-13. Estos sistemas representan uno de los principales mecanismos de organización de la convección en regiones tropicales y están asociados a eventos de precipitación intensa y redistribución de calor y humedad en la atmósfera. La metodología empleada consistió en el procesamiento y análisis temporal de imágenes infrarrojas con una resolución espacial nominal aproximada de 4 km y resolución temporal de 30 minutos. A partir de la segmentación térmica del sistema convectivo se calcularon parámetros físicos y geométricos como el área del sistema, la relación entre el eje menor y el eje mayor, y la temperatura mínima de brillo infrarroja del tope nuboso, permitiendo analizar las diferentes etapas de evolución del sistema convectivo. Los resultados muestran que el sistema alcanzó áreas cercanas a 215,000 km², presentó configuraciones geométricas aproximadamente circulares durante su fase madura y registró temperaturas mínimas de brillo infrarrojo cercanas a -65°C , asociadas a una extensa cobertura nubosa fría y a un elevado grado de organización del sistema convectivo. Asimismo, la evolución conjunta de las variables analizadas permitió identificar patrones consistentes con las etapas de génesis, madurez y disipación características de los CCM. En conjunto, los resultados obtenidos confirman que el sistema estudiado presenta características morfológicas y temporales compatibles con un CCM. Además, el estudio demuestra la utilidad de las imágenes satelitales infrarrojas como herramienta para el monitoreo y análisis de sistemas convectivos organizados en regiones con limitada disponibilidad de observaciones meteorológicas convencionales, como la Amazonía peruana.

Palabras clave: Complejo Convectivo de Mesoescala, temperatura del tope de nube, circularidad, GOES-13, Amazonía peruana.

ABSTRACT

This study analyzes the spatiotemporal evolution of a Mesoscale Convective Complex (MCC) developed over the Peruvian Amazon using thermal infrared satellite imagery from the GOES-13 geostationary satellite. These systems represent one of the main mechanisms responsible for the organization of convection in tropical regions and are associated with intense precipitation events and the redistribution of heat and moisture in the atmosphere. The methodology consisted of processing and temporally analyzing infrared satellite images with an approximate nominal spatial resolution of 4 km and a temporal resolution of 30 minutes. Through thermal segmentation of the convective system, physical and geometrical parameters such as system area, the ratio between the minor and major axes, and the minimum infrared brightness temperature of the cloud top were calculated, allowing the analysis of the different stages of the convective system evolution. The results show that the system reached areas close to $215,000 \text{ km}^2$, exhibited approximately circular geometrical configurations during its mature stage, and registered minimum infrared brightness temperatures near -65°C , associated with an extensive cold cloud shield and a high degree of convective system organization. Furthermore, the combined evolution of the analyzed variables allowed the identification of patterns consistent with the genesis, mature, and dissipation stages characteristic of MCCs. Overall, the obtained results confirm that the studied system presents morphological and temporal characteristics compatible with a MCC. In addition, the study demonstrates the usefulness of infrared satellite imagery as a tool for monitoring and analyzing organized convective systems in regions with limited availability of conventional meteorological observations, such as the Peruvian Amazon.

Keywords: Mesoscale Convective Complex, deep convection, cloud-top temperature, remote sensing, Peruvian Amazon.

ÍNDICE

	<u>Pag.</u>
RESUMEN	I
ABSTRACT	II
LISTA DE TABLAS	V
LISTA DE FIGURAS	VI
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	2
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 Convección atmosférica	5
2.2 Sistemas convectivos de mesoescala	6
2.3 Complejos convectivos de mesoescala	7
2.4 Condiciones atmosféricas para el desarrollo de CCM	8
2.5 Dinámica atmosférica asociada a los CCM	9
2.6 Ciclo de vida de un CCM	9
2.7 Teledetección aplicada al estudio de sistemas convectivos	10
2.8 Parámetros satelitales para la caracterización de CCM	11
2.8.1 Temperatura de brillo del tope de nube	11
2.8.2 Área del sistema convectivo	12
2.8.3 Circularidad y organización espacial	13
2.9 Importancia de los complejos convectivos de mesoescala	13
3 ÁREA DE ESTUDIO, DATOS Y METODOLOGÍA	14
3.1 Área de estudio	14
3.2 Datos	15
3.3 Metodología	15
3.3.1 Procesamiento de datos	15
3.3.2 Identificación del sistema convectivo	16

3.3.3	Delimitación del sistema	16
3.3.4	Cálculo de variables	16
3.3.4.1	Área	16
3.3.4.2	Relación entre ejes y circularidad	16
3.3.4.3	Temperatura de brillo del tope de nube	17
3.4	Limitaciones del estudio	17
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
4.1	Evolución espacio-temporal del complejo convectivo	19
4.2	Evolución del área del sistema convectivo	22
4.3	Evolución de la temperatura de brillo del tope nuboso	24
4.4	Evolución de la circularidad y organización del sistema	25
5	CONCLUSIONES	28
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

LISTA DE TABLAS

Pag.

Tabla 1	Principales parámetros físicos y geométricos del Complejo Convec- tivo de Mesoescala analizado	27
---------	---	----

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pag.</u>
Figura 1 Formación de nubes cúmulos por convección	5
Figura 2 Imagen satelital en el infrarrojo de un sistema convectivo de meso- escala sobre el estado de Missouri	6
Figura 3 Esquema conceptual de la estructura interna y los flujos de un complejo convectivo de mesoescala	7
Figura 4 Representación esquemática e imagen infrarroja de un complejo convectivo de mesoescala	8
Figura 5 Etapas del ciclo de vida de un complejo convectivo de mesoescala .	10
Figura 6 Temperatura del tope de nube durante dos eventos meteorológicos observados por GOES-16	12
Figura 7 Localización y delimitación de la Amazonía peruana	14
Figura 8 Fase de génesis del complejo convectivo de mesoescala	20
Figura 9 Fase de madurez del complejo convectivo de mesoescala	21
Figura 10 Fase de disipación del complejo convectivo de mesoescala	22
Figura 11 Evolución temporal del área del sistema convectivo durante el ciclo de vida del CCM	23
Figura 12 Evolución temporal de la temperatura de brillo del tope nuboso del sistema convectivo	24
Figura 13 Evolución temporal de la relación entre el eje menor y el eje mayor del sistema convectivo	25

1. INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) constituyen uno de los principales mecanismos de organización de la convección en la atmósfera y desempeñan un papel fundamental en la redistribución de calor, humedad y momento en regiones tropicales y subtropicales (Houze, 1994, 2014). Estos sistemas pueden alcanzar extensiones espaciales del orden de cientos de kilómetros y persistir durante varias horas, generando eventos de precipitación intensa, actividad eléctrica y fenómenos meteorológicos severos asociados a convección profunda organizada.

Dentro de esta categoría, los Complejos Convectivos de Mesoescala (CCM) representan una subclase particular caracterizada por su gran extensión espacial, persistencia temporal y estructura aproximadamente circular, definidos originalmente a partir de criterios satelitales infrarrojos propuestos por Maddox (1980). La formación y mantenimiento de estos sistemas están asociados a la interacción entre procesos dinámicos y termodinámicos, incluyendo convergencia de humedad en niveles bajos, divergencia en niveles altos, liberación de calor latente y cizalladura vertical del viento.

Diversos estudios han demostrado que los CCM contribuyen significativamente al balance hídrico y energético de la atmósfera tropical, siendo responsables de una proporción importante de la precipitación en regiones continentales húmedas (Roca *et al.*, 2014; Feng *et al.*, 2018). Asimismo, estos sistemas están asociados a eventos hidrometeorológicos extremos, tales como lluvias intensas, inundaciones, ráfagas de viento y actividad eléctrica, lo que resalta su importancia tanto desde el punto de vista meteorológico como socioeconómico (Velasco, 1994; Yao *et al.*, 2022).

En Sudamérica, la ocurrencia de sistemas convectivos de mesoescala ha sido ampliamente documentada en regiones como la cuenca amazónica y la cuenca del Plata, donde las condiciones termodinámicas y dinámicas favorecen el desarrollo de convección profunda organizada (Poveda *et al.*, 2005; Ferreira y Anabor, 2015). En particular, la Amazonía constituye una de las regiones de mayor actividad convectiva del planeta debido a la elevada disponibilidad de humedad en niveles bajos, la intensa radiación solar y la interacción entre la circulación atmosférica regional y la topografía andina.

En el contexto peruano, la Amazonía representa un entorno altamente favorable para el desarrollo de sistemas convectivos organizados; sin embargo, el estudio detallado de estos fenómenos continúa siendo limitado debido a la escasa disponibilidad de observaciones meteorológicas convencionales y a la complejidad geográfica de la región (Quispe *et al.*, 2009).

Esta limitación resalta la importancia del uso de herramientas de teledetección, particularmente imágenes satelitales en el infrarrojo térmico, las cuales permiten monitorear de manera continua la evolución y estructura de los sistemas convectivos sobre amplias regiones geográficas.

Investigaciones previas han evidenciado que los CCM presentan patrones dinámicos relativamente consistentes, tales como circulación anticiclónica en niveles altos, expansión de regiones estratiformes y liberación significativa de calor latente asociada a convección profunda (Martín *et al.*, 1996; Salinas *et al.*, 2001). No obstante, estos sistemas también presentan variabilidad regional considerable, lo que hace necesario su estudio en contextos específicos como la Amazonía peruana, donde aún existe limitada documentación sobre sus características y evolución.

En este contexto, el presente estudio tiene como propósito analizar la evolución espacio-temporal de un evento representativo de Complejo Convectivo de Mesoescala desarrollado sobre la Amazonía peruana mediante imágenes satelitales infrarrojas del satélite GOES-13. A partir de técnicas de teledetección satelital, se evalúan parámetros físicos y geométricos del sistema convectivo, como el área, la temperatura del tope de nube y la circularidad, con el fin de caracterizar su comportamiento durante las diferentes etapas de su ciclo de vida.

1.1. Motivación

El estudio de los sistemas convectivos de mesoescala, y en particular de los CCM, resulta de gran interés debido a su papel en la organización de la convección profunda y su influencia en la distribución espacial y temporal de la precipitación extrema en regiones tropicales (Houze, 2014). Estos sistemas son capaces de generar eventos de lluvia intensa en periodos relativamente cortos, lo que los convierte en un componente clave de la dinámica atmosférica y de los fenómenos hidrometeorológicos extremos (Maddox, 1980).

En regiones como la Amazonía peruana, donde la convección representa uno de los principales mecanismos atmosféricos responsables de la precipitación y la disponibilidad de datos observacionales es limitada, el análisis de estos sistemas mediante herramientas de teledetección constituye una alternativa importante para mejorar la comprensión de los procesos físicos que gobiernan su formación y evolución.

En este contexto, el uso de imágenes satelitales en el infrarrojo térmico permite estudiar de manera continua la estructura y evolución espacio-temporal de los sistemas convectivos sobre amplias regiones geográficas, superando las limitaciones asociadas a las observaciones meteorológicas convencionales. Asimismo, el análisis de un evento representativo de CCM

permite integrar conocimientos relacionados con dinámica atmosférica, termodinámica y procesamiento de datos satelitales, contribuyendo a una mejor comprensión de la convección organizada en ambientes tropicales húmedos.

1.2. Justificación

Los Complejos Convectivos de Mesoescala constituyen uno de los principales sistemas responsables de la ocurrencia de precipitaciones intensas en regiones tropicales, pudiendo generar impactos significativos asociados a inundaciones, afectación de infraestructura y riesgos para la población (Molina, 2000; Yao *et al.*, 2022). En este sentido, el estudio de estos sistemas resulta fundamental para mejorar la comprensión de los fenómenos hidrometeorológicos extremos y contribuir al desarrollo de estrategias orientadas a la gestión del riesgo y monitoreo meteorológico.

En la Amazonía peruana, la caracterización de los sistemas convectivos organizados presenta dificultades relacionadas con la limitada disponibilidad de observaciones meteorológicas in situ y la complejidad geográfica de la región (Quispe *et al.*, 2009). Frente a estas limitaciones, las imágenes satelitales en el infrarrojo térmico constituyen una herramienta adecuada para analizar la evolución espacial y temporal de los sistemas convectivos, permitiendo identificar sus principales características físicas y morfológicas.

Desde el punto de vista científico, el presente estudio contribuye al conocimiento de la dinámica y evolución de los CCM en una región poco documentada como la Amazonía peruana. Asimismo, desde una perspectiva metodológica, el trabajo aporta al uso de técnicas de procesamiento de imágenes satelitales para la identificación y caracterización de sistemas convectivos organizados, las cuales pueden aplicarse en futuras investigaciones relacionadas con meteorología tropical y monitoreo atmosférico.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Analizar la evolución espacio-temporal de un Complejo Convectivo de Mesoescala desarrollado sobre la Amazonía peruana mediante imágenes satelitales infrarrojas del satélite GOES-13.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar un evento representativo de Complejo Convectivo de Mesoescala mediante criterios satelitales infrarrojos.

- Evaluar la evolución temporal del sistema convectivo mediante parámetros físicos y geométricos como el área, la temperatura del tope de nube y la relación entre ejes.
- Analizar las principales características morfológicas y convectivas del sistema durante las etapas de génesis, madurez y disipación.

2. MARCO TEÓRICO

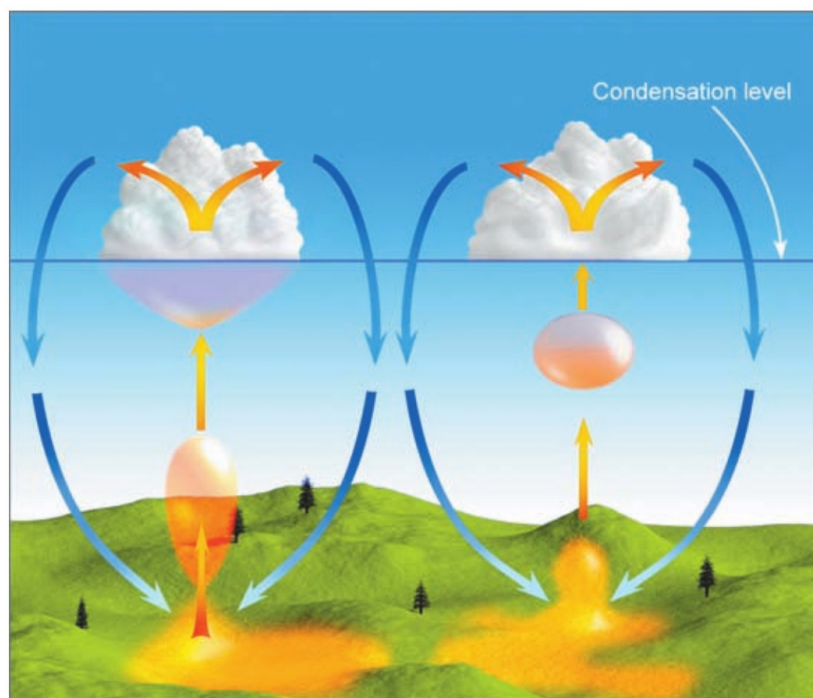
2.1. Convección atmosférica

La convección atmosférica es un proceso fundamental en la transferencia vertical de calor y humedad en la atmósfera, mediante el cual masas de aire cálido y húmedo ascienden debido a su menor densidad en comparación con el entorno circundante (Wallace y Hobbs, 2006; Rogers y Yau, 1989). Este proceso es responsable de la formación de nubes convectivas y de la ocurrencia de precipitaciones intensas, especialmente en regiones tropicales (Houze, 1994).

La Figura 1 ilustra esquemáticamente el proceso de formación de nubes cúmulos, en el cual burbujas de aire cálido se desprenden de la superficie y ascienden, enfriándose progresivamente hasta alcanzar el nivel de condensación.

Figura 1

Formación de nubes cúmulos por convección



Nota. Las burbujas de aire cálido ascienden y se enfrían hasta alcanzar el nivel de condensación; el aire desciende alrededor de la nube. Tomado de *Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment* (11.^a ed.), por C. D. Ahrens y R. Henson, 2015, Cengage Learning.

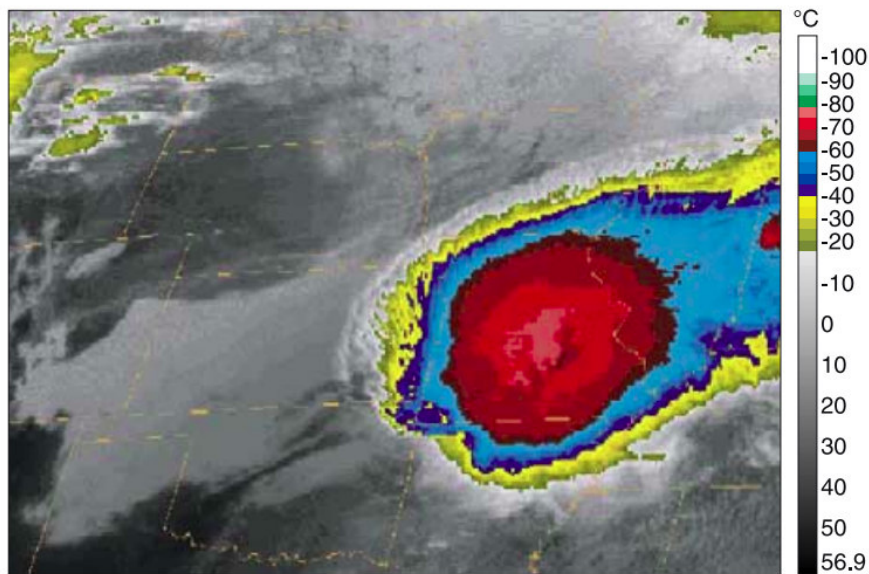
En condiciones favorables de inestabilidad atmosférica, el ascenso del aire puede intensificarse, dando lugar a la formación de nubes cumulonimbus, las cuales constituyen el elemento básico de los sistemas convectivos. La organización de estas estructuras convectivas individuales puede dar lugar a sistemas de mayor escala, como los sistemas convectivos de mesoescala.

2.2. Sistemas convectivos de mesoescala

Los sistemas convectivos de mesoescala (SCM) son conjuntos organizados de nubes convectivas que interactúan entre sí y se extienden espacialmente por escalas del orden de cientos de kilómetros (Figura 2), con una duración que puede variar desde varias horas hasta más de un día (Houze, 2004).

Figura 2

Imagen satelital en el infrarrojo de un sistema convectivo de mesoescala sobre el estado de Missouri



Nota. Imagen de un sistema convectivo de mesoescala sobre el estado de Missouri. La escala lateral muestra la temperatura en grados Celsius. Tomado de Houze (2004).

Estos sistemas se caracterizan por la coexistencia de regiones convectivas activas y áreas de precipitación estratiforme, así como por la presencia de procesos dinámicos como la convergencia en niveles bajos, divergencia en niveles altos y liberación de calor latente, los cuales contribuyen a su mantenimiento y evolución (Moncrieff, 2004).

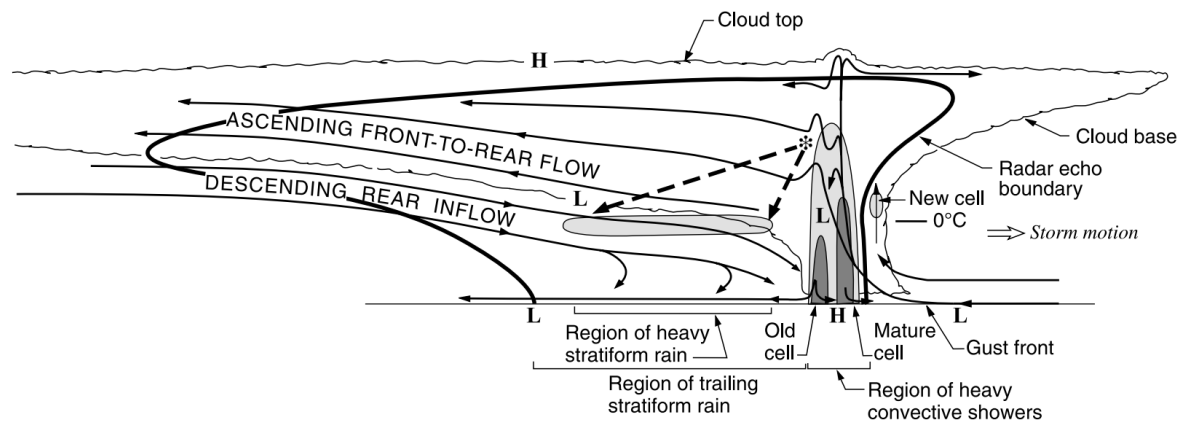
Diversos estudios han demostrado que los SCM desempeñan un papel fundamental en la distribución de la precipitación en regiones tropicales, siendo responsables de una proporción significativa de la lluvia total anual (Roca *et al.*, 2014; Schumacher y Rasmussen, 2020; Chen *et al.*, 2023).

2.3. Complejos convectivos de mesoescala

Los complejos convectivos de mesoescala constituyen una subclase de los SCM, definidos a partir de criterios objetivos basados en imágenes satelitales infrarrojas (Maddox, 1980). Estos criterios permiten diferenciar a los CCM de otros sistemas convectivos mediante parámetros físicos relacionados con su tamaño, forma, duración y temperatura del tope de nube. La Figura 3 muestra la representación esquemática de un CCM. Asimismo, el lado izquierdo de la Figura 4 presenta una ilustración esquemática de un CCM, mientras que el lado derecho de la Figura 4 muestra observaciones infrarrojas obtenidas mediante radar.

Figura 3

Esquema conceptual de la estructura interna y los flujos de un complejo convectivo de mesoescala



Nota. El esquema muestra las regiones convectivas y estratiformes, así como los flujos de aire asociados al sistema. Tomado de Houze (2004).

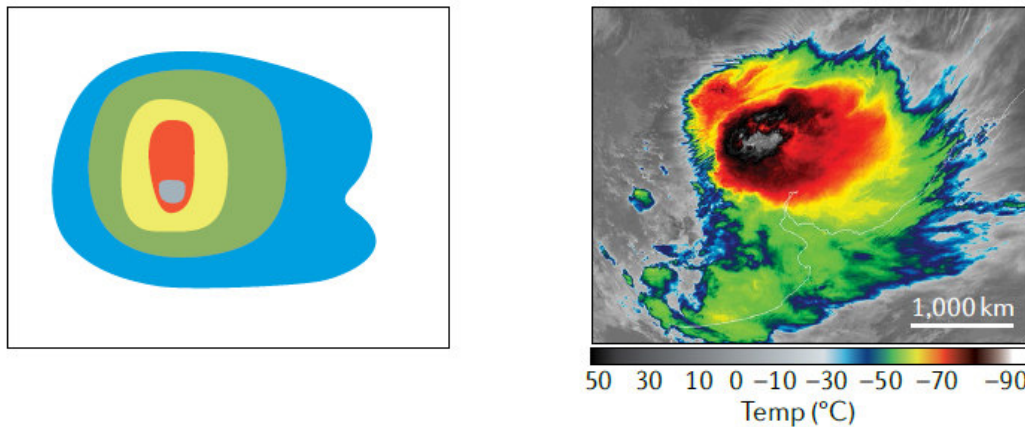
Entre las principales características de los CCM se encuentran:

- Gran extensión espacial, con áreas superiores a 100,000 km².
- Persistencia temporal mayor a 6 horas.
- Temperaturas bajas en el tope de nube, asociadas a convección profunda.
- Estructura aproximadamente circular en su fase de máxima extensión.

Estas características reflejan un alto grado de organización interna, resultado de la interacción entre procesos dinámicos y termodinámicos que favorecen la formación y mantenimiento del sistema.

Figura 4

Representación esquemática e imagen infrarroja de un complejo convectivo de mesoescala



Nota. A la izquierda se presenta una representación esquemática del complejo convectivo de mesoescala; a la derecha, una imagen infrarroja. La escala de colores indica la temperatura en grados Celsius. Tomado de [Schumacher y Rasmussen \(2020\)](#).

2.4. Condiciones atmosféricas para el desarrollo de CCM

El desarrollo de los complejos convectivos de mesoescala está condicionado por la presencia de un ambiente termodinámicamente inestable y dinámicamente favorable. Entre los principales factores que contribuyen a su formación se encuentran la alta disponibilidad de humedad en niveles bajos, la inestabilidad atmosférica y la presencia de cizalladura vertical del viento ([Weisman y Klemp, 1986](#); [Moncrieff, 2004](#)).

La inestabilidad atmosférica puede ser evaluada mediante parámetros como la Energía Potencial Convectiva Disponible (CAPE), la cual cuantifica la cantidad de energía disponible para el ascenso del aire. Valores elevados de CAPE favorecen el desarrollo de convección profunda, facilitando la formación de sistemas convectivos organizados.

Por otro lado, la cizalladura vertical del viento juega un papel fundamental en la organización de las tormentas, permitiendo la separación entre corrientes ascendentes y descendentes, lo que favorece la persistencia del sistema en el tiempo ([Rotunno *et al.*, 1988](#)).

2.5. Dinámica atmosférica asociada a los CCM

Los CCM están asociados a procesos dinámicos que involucran la interacción entre la convergencia en niveles bajos y la divergencia en niveles altos. La convergencia de aire cálido y húmedo en superficie favorece el ascenso del aire, mientras que la divergencia en niveles superiores permite la evacuación de masa, facilitando el mantenimiento del sistema ([Houze, 1994](#)).

Asimismo, la liberación de calor latente durante la condensación del vapor de agua contribuye al fortalecimiento de las corrientes ascendentes, generando retroalimentación positiva que favorece la intensificación del sistema convectivo.

En este contexto, la vorticidad ciclónica en niveles bajos puede incrementarse debido a la convergencia, contribuyendo a la organización del sistema y a su persistencia temporal.

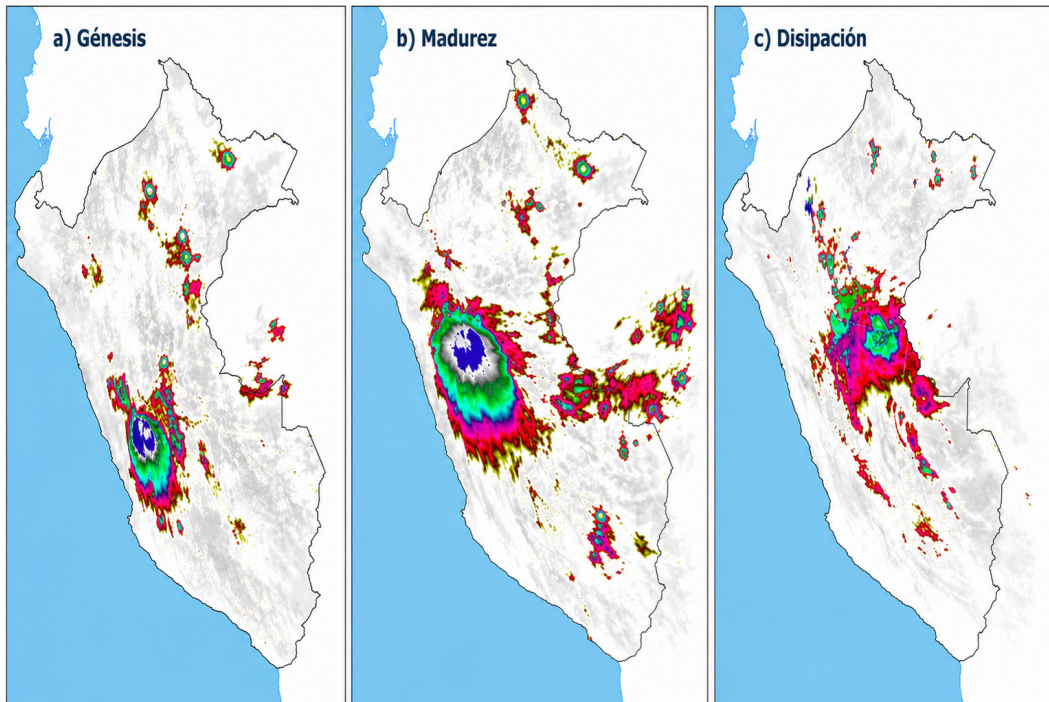
2.6. Ciclo de vida de un CCM

El desarrollo de un complejo convectivo de mesoescala puede describirse a través de un ciclo de vida compuesto por tres etapas principales: génesis, madurez y disipación ([Maddox, 1980](#); [Velasco y Fritsch, 1987](#)).

La Figura 5 muestra una representación esquemática del ciclo de vida de un CCM. Durante la etapa de génesis, se produce la formación de células convectivas individuales en un ambiente inestable, las cuales comienzan a interactuar y organizarse. En la fase de madurez, el sistema alcanza su máxima extensión y presenta una estructura bien definida, caracterizada por la coexistencia de convección intensa y precipitación estratiforme. Finalmente, en la etapa de disipación, el sistema pierde organización debido a la disminución del aporte de humedad y energía, así como a cambios en las condiciones ambientales.

Figura 5

Etapas del ciclo de vida de un complejo convectivo de mesoescala



Nota. Los paneles muestran las etapas del ciclo de vida del sistema: a) génesis, b) madurez y c) disipación.

2.7. Teledetección aplicada al estudio de sistemas convectivos

El uso de imágenes satelitales en el infrarrojo térmico constituye una herramienta fundamental para el análisis de sistemas convectivos, especialmente en regiones con limitada cobertura de observaciones in situ. Este tipo de imágenes permite estimar la temperatura de brillo asociada al tope de nube a partir de la radiación emitida por la superficie nubosa (Kidd y Vonder Haar, 1995).

En el canal infrarrojo, las nubes con mayor desarrollo vertical presentan temperaturas más bajas, debido a que sus topos se encuentran a mayores altitudes en la atmósfera. Esta característica permite identificar regiones de convección profunda y delimitar sistemas convectivos de gran escala.

El uso de satélites geoestacionarios, como el GOES-13, permite obtener información con alta resolución temporal, lo cual resulta fundamental para analizar la evolución de los sistemas convectivos en el tiempo.

2.8. Parámetros satelitales para la caracterización de CCM

La caracterización de complejos convectivos de mesoescala mediante imágenes satelitales infrarrojas se basa en el análisis de parámetros físicos y geométricos que permiten evaluar la intensidad, extensión y organización espacial del sistema convectivo. Entre los principales parámetros utilizados destacan la temperatura del tope de nube, el área del sistema convectivo y la circularidad o relación entre ejes del sistema.

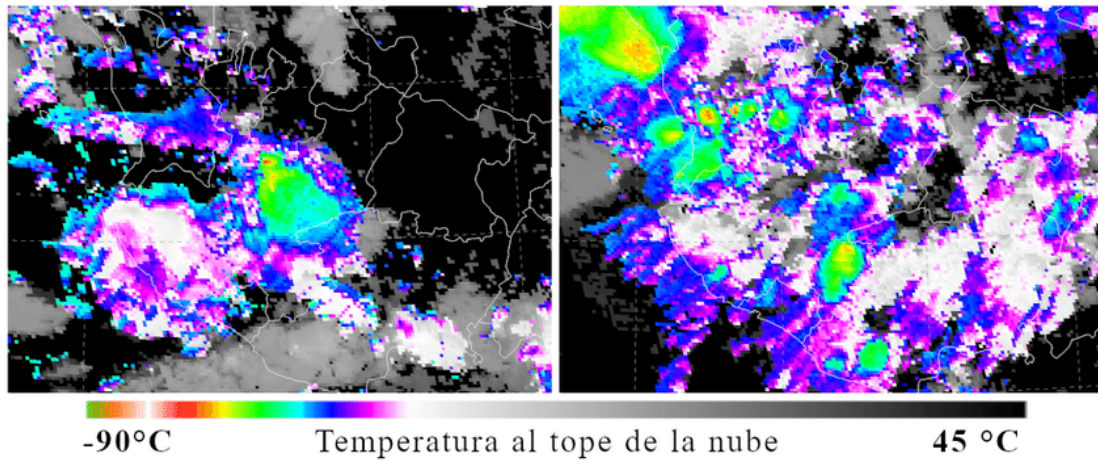
2.8.1. Temperatura de brillo del tope de nube

La temperatura del tope de nube constituye una de las variables más importantes en el estudio de sistemas convectivos, ya que permite inferir indirectamente la altura y el desarrollo vertical de las nubes. En imágenes satelitales infrarrojas, temperaturas más bajas están asociadas a topes nubosos ubicados a mayores altitudes, lo que representa convección más intensa y corrientes ascendentes más profundas ([Houze, 2014](#)).

En el contexto de los complejos convectivos de mesoescala, la presencia de extensas áreas con temperaturas inferiores a -52°C constituye uno de los principales criterios satelitales para su identificación ([Maddox, 1980](#)). Estas temperaturas reflejan un importante desarrollo vertical de las nubes convectivas y una significativa liberación de calor latente en niveles altos de la troposfera.

Figura 6

Temperatura del tope de nube durante dos eventos meteorológicos observados por GOES-16



Nota. Temperatura del tope de nube en grados Celsius, derivada del satélite GOES-16 durante la granizada del 30 de junio de 2019 (izquierda) y el tornado del 18 de julio de 2020 (derecha). Adaptado de [León-Cruz y Pineda-Martínez \(2021\)](#).

La evolución temporal de la temperatura del tope de nube permite además identificar las distintas etapas del ciclo de vida de un sistema convectivo, diferenciando periodos de intensificación, madurez y disipación.

2.8.2. Área del sistema convectivo

El área del sistema convectivo es un parámetro fundamental para evaluar la evolución espacial y el grado de organización de los sistemas convectivos de mesoescala. En estudios basados en imágenes satelitales, el área se determina mediante la delimitación de regiones nubosas que cumplen determinados umbrales de temperatura infrarroja.

El crecimiento progresivo del área refleja la interacción y consolidación de múltiples células convectivas, así como la expansión horizontal de la región estratiforme asociada al sistema ([Houze, 2004](#)). Los CCM se caracterizan por alcanzar extensiones espaciales superiores a los 100,000 km², lo que evidencia un elevado grado de organización convectiva.

Asimismo, la persistencia temporal de áreas extensas con temperaturas bajas en el tope de nube constituye una característica distintiva de los sistemas convectivos organizados de larga duración.

2.8.3. Circularidad y organización espacial

La forma geométrica del sistema convectivo representa un indicador importante de su grado de organización interna. Uno de los parámetros más utilizados para evaluar esta característica es la relación entre el eje menor y el eje mayor de una elipse ajustada al sistema convectivo.

Durante las primeras etapas de desarrollo, los sistemas convectivos suelen presentar estructuras irregulares y elongadas asociadas a la presencia de células convectivas dispersas. Sin embargo, a medida que el sistema evoluciona y alcanza mayores niveles de organización, la estructura tiende a adquirir una configuración más compacta y aproximadamente circular.

De acuerdo con los criterios establecidos por Maddox (1980), los complejos convectivos de mesoescala presentan una estructura aproximadamente circular durante su fase de máxima extensión espacial. Por ello, la evolución de la circularidad constituye un parámetro útil para evaluar el proceso de organización y madurez del sistema convectivo.

La combinación del análisis de temperatura del tope de nube, área y circularidad permite realizar una caracterización integral de los complejos convectivos de mesoescala mediante técnicas de teledetección satelital.

2.9. Importancia de los complejos convectivos de mesoescala

Los complejos convectivos de mesoescala desempeñan un papel fundamental en la dinámica atmosférica tropical, contribuyendo significativamente a la redistribución de energía y humedad en la atmósfera (Houze, 2014). Estos sistemas están asociados a una proporción considerable de la precipitación en regiones tropicales, pudiendo representar más del 50 % del total anual en algunas zonas (Feng *et al.*, 2018).

En Sudamérica, la ocurrencia de sistemas convectivos de mesoescala ha sido ampliamente documentada, particularmente en regiones como la Amazonía y la cuenca del Plata, donde las condiciones termodinámicas y dinámicas favorecen el desarrollo de convección organizada (Poveda *et al.*, 2005; Ferreira y Anabor, 2015). En estas regiones, los CCM contribuyen significativamente al balance hídrico y están asociados a eventos de precipitación intensa.

En el Perú, estudios previos han evidenciado la presencia de estos sistemas, destacando su influencia en la generación de lluvias intensas en la región amazónica (Quispe *et al.*, 2009). Sin embargo, la caracterización detallada de estos fenómenos aún es limitada, lo que resalta la necesidad de investigaciones que permitan comprender mejor su comportamiento en esta región.

3. ÁREA DE ESTUDIO, DATOS Y METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a la región amazónica del Perú, ubicada en la parte nororiental del territorio nacional. Esta región constituye uno de los principales centros de actividad convectiva de Sudamérica, debido a la elevada disponibilidad de humedad en niveles bajos, la intensa radiación solar y la interacción entre la circulación atmosférica regional y la topografía andina. Estas condiciones favorecen el desarrollo frecuente de convección profunda y sistemas convectivos organizados.

Figura 7

Localización y delimitación de la Amazonía peruana



Nota. El contorno negro delimita el área de estudio correspondiente a la Amazonía peruana.

Asimismo, la proximidad a la Cordillera de los Andes influye en la dinámica atmosférica local, generando mecanismos de forzamiento que favorecen el ascenso del aire y la formación de sistemas convectivos organizados.

3.2. Datos

Para el desarrollo del presente estudio se utilizaron imágenes satelitales del canal infrarrojo térmico (IR) del satélite geoestacionario GOES-13 (Hillger y Schmit, 2009), específicamente de la banda centrada en $10.7\ \mu\text{m}$, la cual permite estimar la temperatura de brillo asociada al tope de nube.

El uso del canal infrarrojo resulta especialmente adecuado para el análisis de sistemas convectivos, debido a que las temperaturas más bajas de brillo se encuentran asociadas a nubes con mayor desarrollo vertical y convección profunda.

Las imágenes utilizadas presentan una resolución temporal de 30 minutos y una resolución espacial aproximada de 4 km en el nadir del satélite. La variable analizada corresponde a la temperatura de brillo infrarroja expresada en Kelvin (K).

El periodo de análisis corresponde a un evento específico de Complejo Convectivo de Mesoescala identificado sobre la Amazonía peruana. Las imágenes analizadas abarcan desde las 23:15 UTC del 2 de febrero de 2015 hasta las 10:45 UTC del 3 de febrero de 2015, intervalo temporal que comprende las etapas de génesis, madurez y disipación del sistema convectivo.

3.3. Metodología

La metodología empleada en este estudio se divide en cuatro etapas principales: procesamiento de datos, identificación del sistema convectivo, delimitación espacial y cálculo de variables.

3.3.1. Procesamiento de datos

Las imágenes satelitales fueron procesadas utilizando el software *Grid Analysis and Display System* (GrADS), mediante archivos de control (.ctl) que permiten la visualización y manipulación de datos georreferenciados.

Se realizó la lectura secuencial y visualización temporal de las imágenes infrarrojas con el fin de analizar la evolución espacio-temporal del sistema convectivo durante su ciclo de vida.

3.3.2. Identificación del sistema convectivo

La identificación del complejo convectivo de mesoescala se realizó siguiendo los criterios establecidos por Maddox (1980), basados en umbrales de temperatura del tope de nube:

- Temperatura menor a -32°C para delimitar el sistema convectivo general.
- Temperatura menor a -52°C para identificar la región de convección profunda.

Asimismo, se verificó que el sistema cumpla con los criterios de extensión espacial y duración mínima establecidos para los CCM.

3.3.3. Delimitación del sistema

La delimitación espacial del sistema convectivo se realizó mediante la identificación de píxeles que cumplieran con los umbrales de temperatura definidos para los CCM. Posteriormente, los píxeles contiguos fueron agrupados para conformar regiones convectivas espacialmente conectadas, permitiendo identificar la estructura principal del sistema en cada instante temporal.

A partir de esta segmentación térmica se obtuvo la región correspondiente al sistema convectivo, sobre la cual se calcularon las variables geométricas y termodinámicas analizadas en el presente estudio.

3.3.4. Cálculo de variables

3.3.4.1. Área

El área del sistema convectivo se calculó a partir del número de píxeles identificados dentro del umbral de temperatura:

$$A = N \cdot A_{pixel}$$

en esta expresión, N representa el número de píxeles y A_{pixel} corresponde al área aproximada representada por cada píxel del satélite. Considerando la resolución espacial nominal del canal infrarrojo del GOES-13, cada píxel posee una dimensión aproximada de 4×4 km en el nadir del satélite, equivalente a un área cercana a 16 km^2 . Sin embargo, esta aproximación introduce incertidumbres debido a la variación espacial del tamaño efectivo del píxel fuera del nadir, particularmente sobre regiones alejadas de la posición sub-satelital.

3.3.4.2. Relación entre ejes y circularidad

La forma del sistema convectivo fue evaluada mediante la relación entre el eje menor y el eje mayor de una elipse ajustada a la región segmentada del sistema convectivo. Este

parámetro geométrico permite analizar la evolución morfológica y el grado de circularidad del sistema durante su ciclo de vida.

La relación entre ejes se calculó mediante:

$$R = \frac{b}{a}$$

en esta expresión, a y b representan el eje mayor y el eje menor de la elipse ajustada, respectivamente. Valores de R cercanos a 1 indican estructuras aproximadamente circulares, mientras que valores menores representan configuraciones más elongadas o irregulares.

3.3.4.3. Temperatura de brillo del tope de nube

La temperatura mínima de brillo infrarroja del tope nuboso se determinó a partir de los valores de temperatura registrados dentro de la región segmentada del sistema convectivo en cada instante de tiempo.

$$T_{min} = \min(T_i)$$

en esta ecuación, T_i representa la temperatura de cada píxel perteneciente al sistema convectivo.

La temperatura mínima constituye un indicador de la intensidad de la convección profunda, ya que valores más bajos están asociados a un mayor desarrollo vertical de las nubes convectivas.

3.4. Limitaciones del estudio

El presente estudio presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas en la interpretación de los resultados obtenidos. Estas limitaciones están principalmente asociadas a las características de los datos satelitales utilizados y a la disponibilidad de información observacional complementaria.

- La resolución espacial nominal aproximada de 4 km del satélite GOES-13 puede introducir incertidumbre en la delimitación precisa de las estructuras convectivas, especialmente en regiones con núcleos convectivos de pequeña escala o bordes nubosos irregulares. Asimismo, el tamaño efectivo del píxel puede variar espacialmente debido a la geometría de observación del satélite geoestacionario, particularmente fuera del nadir.
- La resolución temporal de 30 minutos puede limitar la identificación detallada de cambios rápidos en la evolución convectiva del sistema, particularmente durante las etapas de intensificación y disipación.

- El uso de umbrales fijos de temperatura para la identificación del sistema convectivo constituye una aproximación simplificada de la convección profunda, pudiendo excluir o incluir regiones nubosas que no representen necesariamente actividad convectiva intensa.
- La ausencia de observaciones meteorológicas in situ, datos radar y perfiles atmosféricos limita la validación detallada de la estructura interna, dinámica y condiciones termodinámicas asociadas al Complejo Convectivo de Mesoescala analizado.
- La temperatura de brillo infrarroja representa una estimación indirecta de la temperatura del tope de nube, por lo que pueden existir incertidumbres asociadas a la interpretación de la intensidad convectiva únicamente a partir de información satelital infrarroja.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evolución espacio-temporal del complejo convectivo

El análisis de las imágenes satelitales infrarrojas permitió identificar un sistema convectivo organizado que cumple con las características típicas de un Complejo Convectivo de Mesoescala (CCM), de acuerdo con los criterios propuestos por Maddox (1980). El sistema presentó un ciclo de vida claramente definido, compuesto por las etapas de génesis, madurez y disipación.

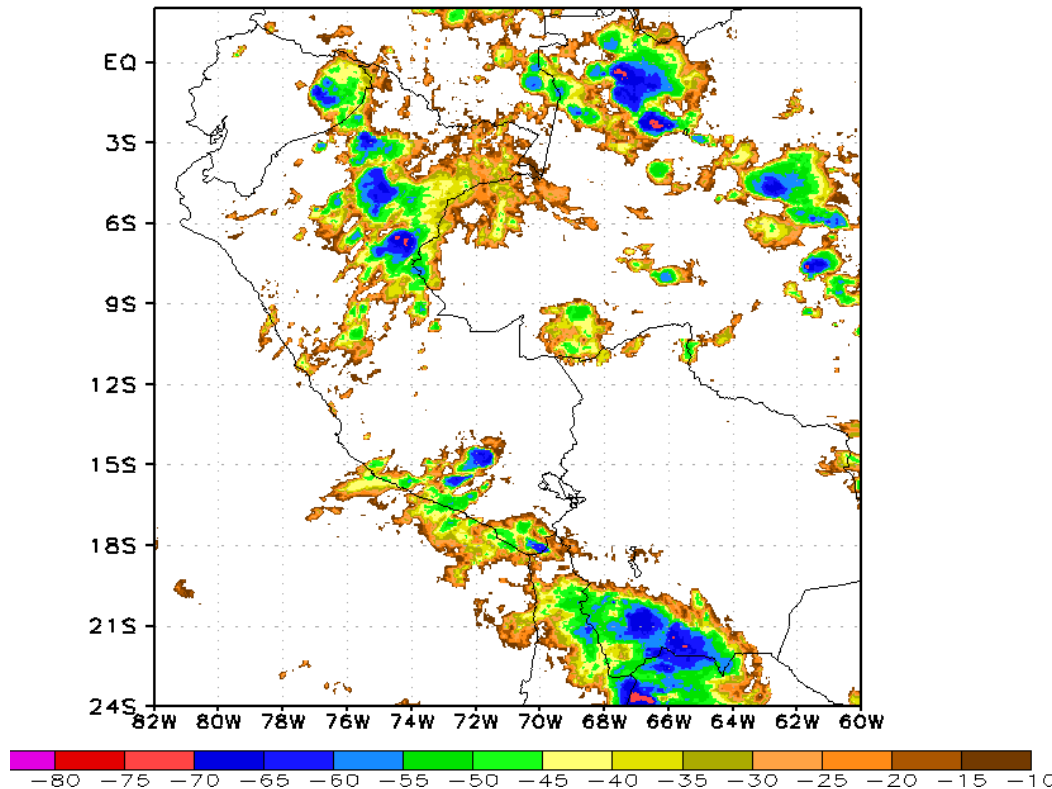
La identificación de las etapas de génesis, madurez y disipación del sistema convectivo se realizó mediante un análisis conjunto de la evolución visual de las imágenes infrarrojas, la organización espacial del sistema y el comportamiento temporal de parámetros como el área, la temperatura de brillo del tope nuboso y la relación entre ejes. En este contexto, la fase de madurez fue asociada al periodo en el cual el sistema presentó una estructura espacial más organizada, compacta y aproximadamente circular, acompañada de una extensa cobertura nubosa fría.

Si bien los valores máximos de área y circularidad no ocurrieron exactamente en el mismo instante temporal que las temperaturas mínimas de brillo infrarrojo, la evolución observada resulta consistente con el comportamiento típico de sistemas convectivos organizados, donde la máxima expansión espacial puede ocurrir posteriormente al desarrollo inicial de los núcleos convectivos más intensos.

Las Figuras 8, 9 y 10 muestran la evolución espacio-temporal del sistema convectivo durante las principales etapas de su desarrollo. En la fase de génesis (Figura 8), correspondiente a las 23:45 UTC del 2 de febrero de 2015, se observa la presencia de núcleos convectivos dispersos sobre la Amazonía occidental. Durante esta etapa inicial, el sistema presenta una estructura aún desorganizada, caracterizada por células convectivas aisladas y regiones con temperaturas moderadamente bajas en el tope de nube.

Figura 8

Fase de génesis del complejo convectivo de mesoescala



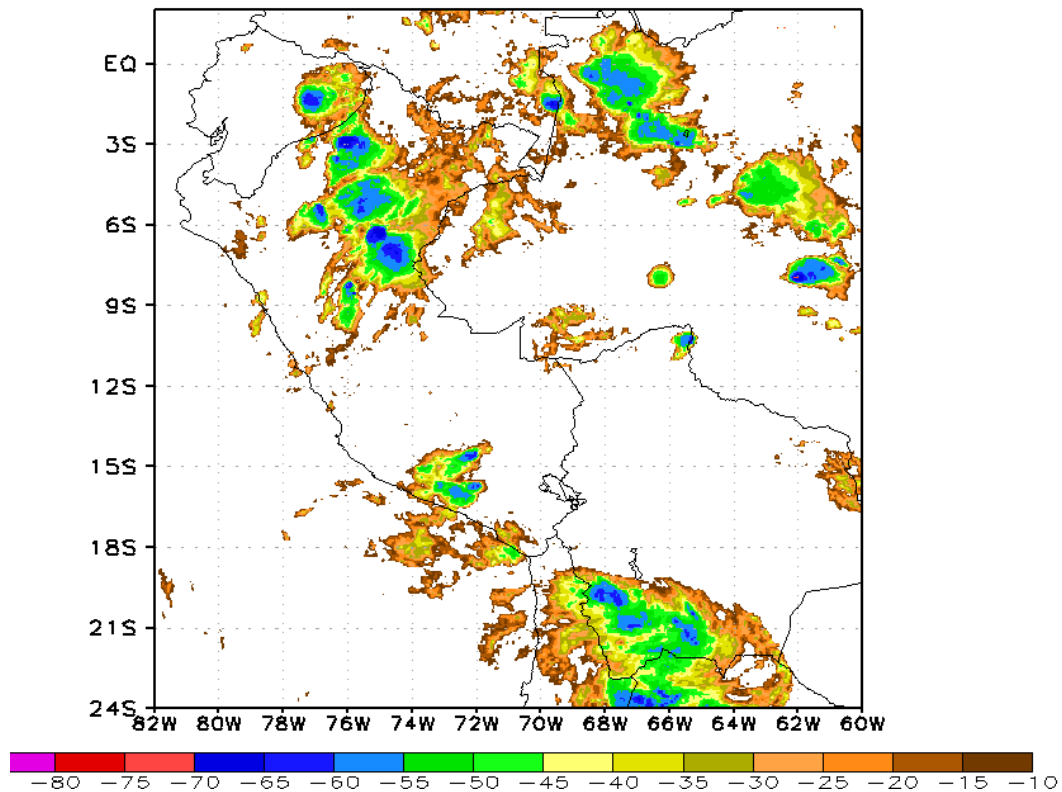
Nota. Observación correspondiente al 2 de febrero de 2015 a las 23:45 UTC. La escala de colores representa la temperatura de brillo del tope de nube en grados Celsius. UTC = tiempo universal coordinado.

Posteriormente, durante la fase de madurez (Figura 9), correspondiente a las 01:45 UTC del 3 de febrero de 2015, el sistema alcanza un mayor grado de organización espacial, evidenciándose la consolidación de un extenso escudo nuboso con regiones de temperaturas significativamente bajas. Asimismo, se observa una estructura más compacta y aproximadamente circular, característica típica de los CCM durante su máxima intensidad.

El desarrollo de una amplia cobertura nubosa fría durante esta etapa sugiere la interacción y consolidación de múltiples núcleos convectivos dentro de una estructura organizada de gran escala. Este comportamiento es consistente con la coexistencia de regiones convectivas activas y amplias áreas estratiformes, rasgo característico de los sistemas convectivos de mesoescala desarrollados en ambientes tropicales húmedos.

Figura 9

Fase de madurez del complejo convectivo de mesoescala



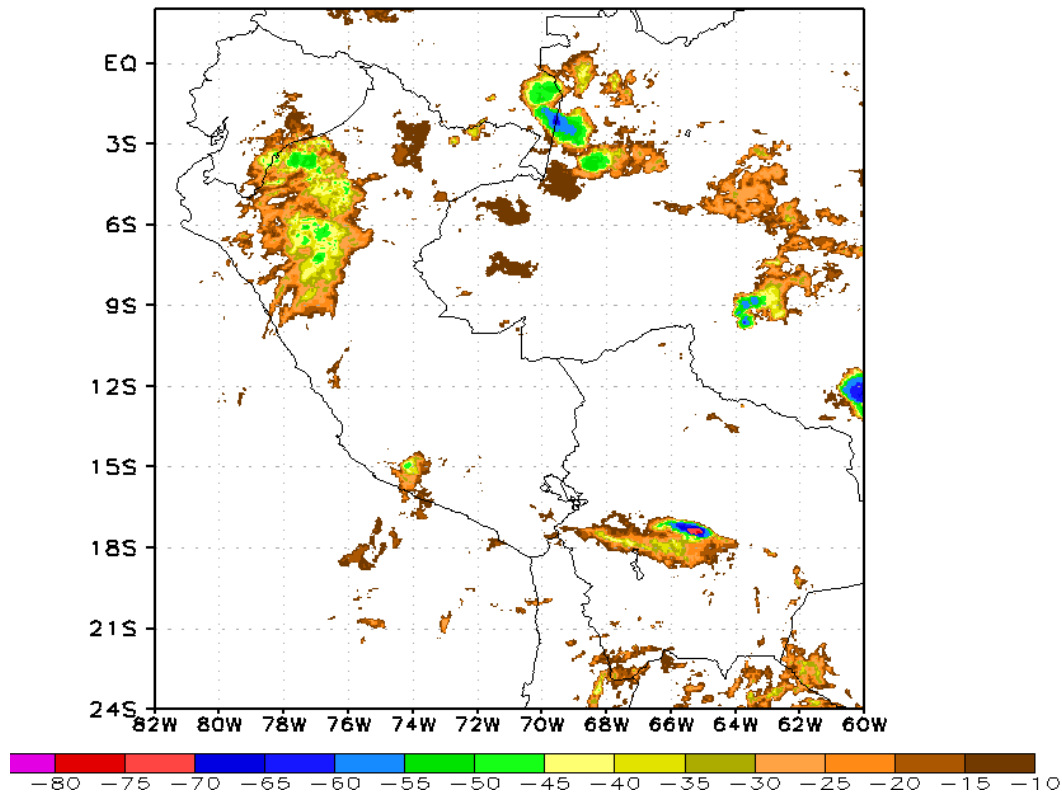
Nota. Observación correspondiente al 3 de febrero de 2015 a las 01:45 UTC. La escala de colores representa la temperatura de brillo del tope de nube en grados Celsius. UTC = tiempo universal coordinado.

Finalmente, en la fase de disipación (Figura 10), correspondiente a las 09:45 UTC del 3 de febrero de 2015, el sistema pierde organización interna y presenta fragmentación de las regiones convectivas más intensas. Durante esta etapa se observa una reducción de la cobertura nubosa fría y un incremento progresivo de la temperatura de brillo del tope nuboso, lo cual sugiere un debilitamiento de la actividad convectiva y una disminución de la organización del sistema.

El comportamiento observado es consistente con el ciclo de vida conceptual descrito para los CCM en estudios previos realizados por Maddox (1980); Houze (2004); Velasco y Fritsch (1987), donde la interacción entre múltiples células convectivas conduce al desarrollo de sistemas organizados de gran extensión espacial.

Figura 10

Fase de disipación del complejo convectivo de mesoescala



Nota. Observación correspondiente al 3 de febrero de 2015 a las 09:45 UTC. La escala de colores representa la temperatura de brillo del tope de nube en grados Celsius. UTC = tiempo universal coordinado.

4.2. Evolución del área del sistema convectivo

La evolución temporal del área del sistema convectivo se presenta en la Figura 11. Durante las primeras horas del evento se observa un crecimiento progresivo del área, pasando de valores cercanos a 45,000 km² hasta alcanzar aproximadamente 215,000 km² durante la fase madura del sistema.

El incremento del área refleja la organización progresiva de células convectivas individuales y la expansión horizontal de la región estratiforme asociada al sistema. Este comportamiento es característico de los CCM, los cuales presentan una importante expansión espacial como resultado de la interacción y fusión de múltiples núcleos convectivos.

El máximo desarrollo espacial se alcanza aproximadamente entre las 05:45 UTC y 06:15 UTC, coincidiendo con la etapa de mayor organización estructural del sistema. Durante este periodo, el CCM presenta una cobertura nubosa extensa y continua, consistente con un sistema convectivo altamente organizado y con una amplia región de nubosidad fría.

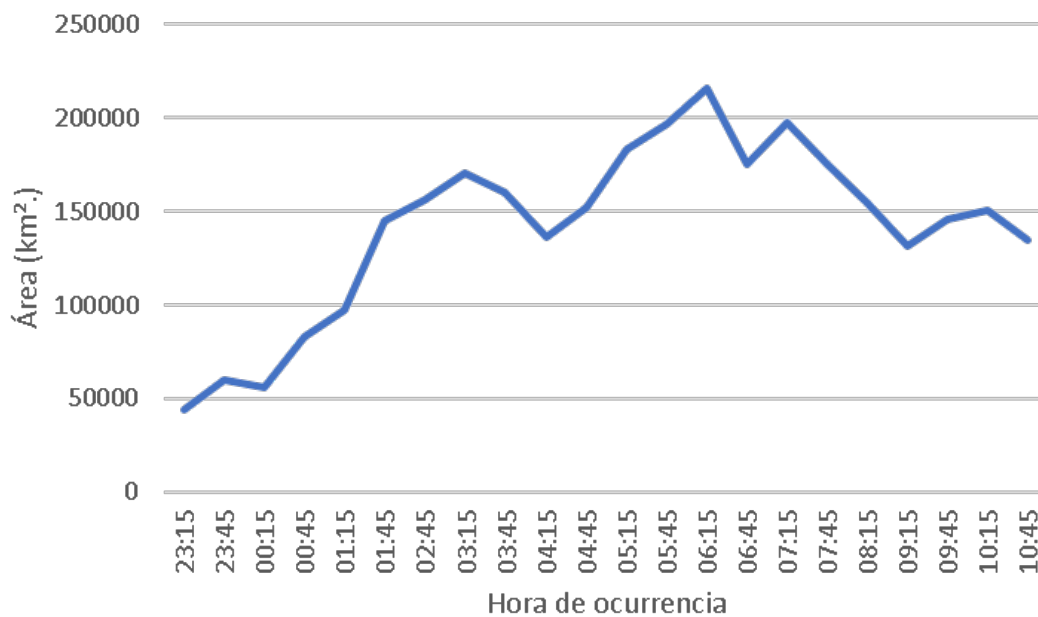
Asimismo, la persistencia temporal de áreas extensas con bajas temperaturas de brillo infrarrojo sugiere la presencia de un sistema convectivo organizado y persistente durante varias horas, característica fundamental de los CCM desarrollados sobre regiones tropicales húmedas.

Posteriormente, se observa una disminución gradual del área del sistema, indicando el inicio de la fase de disipación. Esta reducción espacial podría estar asociada a una disminución progresiva de la organización convectiva y del desarrollo del sistema.

El comportamiento observado es consistente con lo reportado por Houze (2004); Schumacher y Rasmussen (2020), quienes describen que la expansión del área estratiforme constituye una característica fundamental en la evolución de sistemas convectivos organizados de mesoescala.

Figura 11

Evolución temporal del área del sistema convectivo durante el ciclo de vida del CCM



Nota. El eje horizontal muestra la hora de ocurrencia y el eje vertical, el área del sistema convectivo en kilómetros cuadrados. CCM = complejo convectivo de mesoescala.

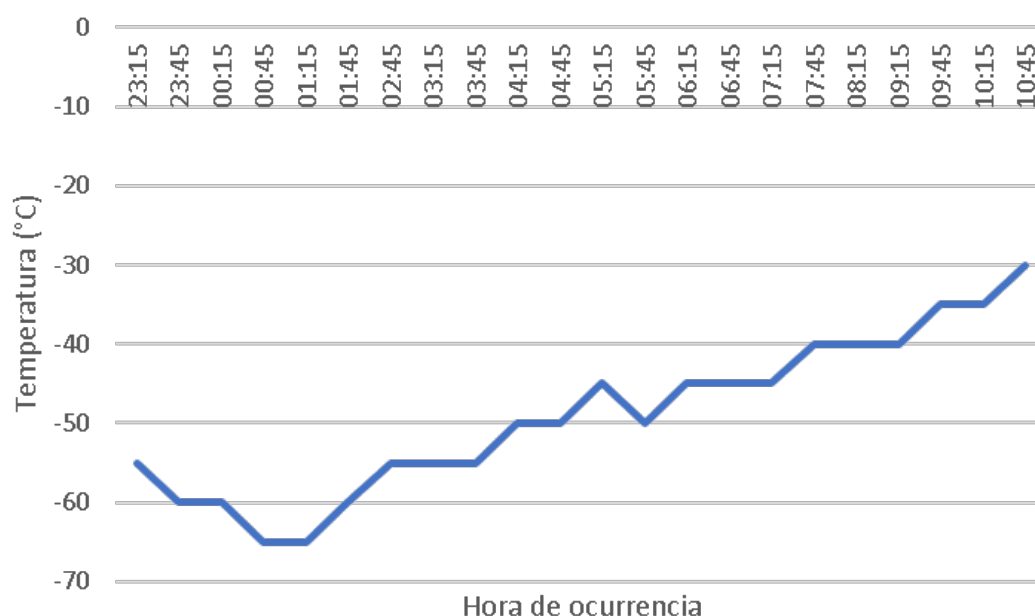
4.3. Evolución de la temperatura de brillo del tope nuboso

La Figura 12 presenta la evolución temporal de la temperatura de brillo del tope nuboso del sistema convectivo. Durante la fase inicial del evento se observa una disminución progresiva de la temperatura, alcanzándose valores mínimos cercanos a -65°C entre las 00:15 UTC y 00:45 UTC.

La disminución de la temperatura de brillo del tope nuboso sugiere un incremento en el grado de organización y desarrollo del sistema convectivo. Este comportamiento es consistente con sistemas convectivos organizados que presentan extensas regiones de nubosidad fría.

Figura 12

Evolución temporal de la temperatura de brillo del tope nuboso del sistema convectivo



Nota. El eje horizontal muestra la hora de ocurrencia y el eje vertical, la temperatura de brillo del tope nuboso en grados Celsius.

Las temperaturas extremadamente bajas registradas durante la fase madura sugieren la presencia de una extensa cobertura nubosa fría y un elevado grado de organización del sistema convectivo. Valores de temperatura inferiores a -52°C constituyen además uno de los principales criterios satelitales utilizados para la identificación de CCM según Maddox (1980).

A medida que el sistema evoluciona hacia la fase de disipación, la temperatura de bri-

llo del tope nuboso presenta un incremento gradual hasta valores próximos a -30°C . Este comportamiento sugiere una disminución progresiva de la organización del sistema y de la extensión de la cobertura nubosa fría.

La evolución observada es consistente con estudios previos realizados sobre sistemas convectivos tropicales, donde las menores temperaturas de brillo infrarrojo están asociadas a las fases de mayor organización espacial del sistema (Houze, 2014; Schumacher y Rasmusen, 2020).

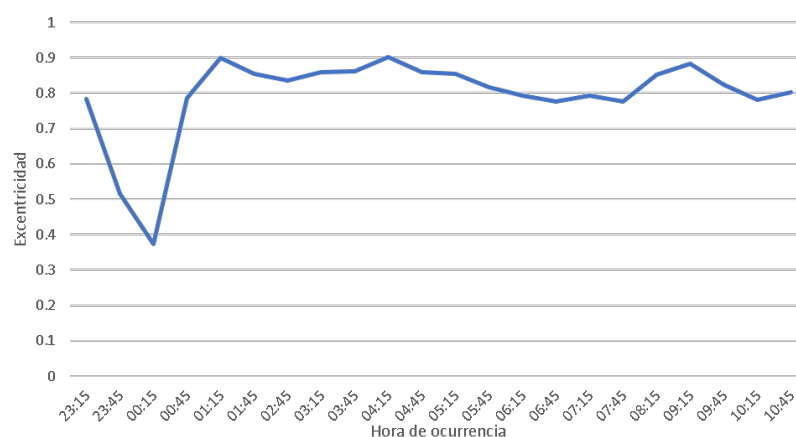
4.4. Evolución de la circularidad y organización del sistema

La evolución temporal de la relación entre el eje menor y el eje mayor del sistema convectivo se presenta en la Figura 13. Este parámetro geométrico permite evaluar los cambios en la morfología y el grado de organización espacial del CCM a lo largo de su ciclo de vida.

Durante las primeras etapas de desarrollo, el sistema presenta valores relativamente bajos de circularidad, asociados a configuraciones irregulares y elongadas. Este comportamiento refleja la presencia de núcleos convectivos aún dispersos y una limitada organización interna del sistema.

Figura 13

Evolución temporal de la relación entre el eje menor y el eje mayor del sistema convectivo



Nota. La relación entre el eje menor y el eje mayor es adimensional. Los valores próximos a uno indican una forma aproximadamente circular; los valores menores corresponden a formas más alargadas.

Posteriormente, entre las 01:15 UTC y 05:15 UTC, la relación entre ejes alcanza valores cercanos a 0.9, indicando una configuración más compacta y aproximadamente circular. Esta transición geométrica sugiere un mayor grado de organización espacial del sistema convectivo, característico de los CCM durante su fase madura.

Asimismo, la mayor simetría espacial observada durante este periodo coincide con la etapa de máxima expansión del sistema y con la presencia de una extensa cobertura nubosa fría. La tendencia hacia formas más circulares durante la fase de madurez es consistente con los criterios morfológicos establecidos por Maddox (1980), quien señala que los Complejos Convectivos de Mesoescala presentan una estructura aproximadamente circular durante su máximo desarrollo.

La coexistencia de una extensa cobertura nubosa fría, una estructura espacial compacta y una evolución temporal persistente sugiere la interacción y consolidación de múltiples núcleos convectivos dentro de una estructura organizada de gran escala. Este comportamiento es consistente con la coexistencia de regiones convectivas activas y amplias áreas estratiformes, comportamiento característico de los sistemas convectivos de mesoescala desarrollados en ambientes tropicales húmedos.

Finalmente, durante la fase de disipación, la circularidad disminuye nuevamente, reflejando la fragmentación progresiva del sistema y la pérdida de coherencia espacial entre las regiones convectivas y estratiformes. Este comportamiento sugiere una disminución progresiva de la organización del sistema convectivo.

En conjunto, la evolución simultánea del área, la temperatura de brillo del tope nuboso y la circularidad evidencia un comportamiento coherente con el ciclo de vida típico de un Complejo Convectivo de Mesoescala desarrollado en un ambiente tropical húmedo. Asimismo, la Tabla 1 resume los principales parámetros físicos y geométricos obtenidos durante el análisis del sistema convectivo, permitiendo sintetizar las características más relevantes observadas durante su evolución.

Tabla 1

Principales parámetros físicos y geométricos del Complejo Convectivo de Mesoescala analizado

Parámetro	Valor	Hora (UTC)	Interpretación
Área máxima	215,000 km ²	06:15	Máxima expansión espacial del sistema convectivo.
Temperatura mínima de brillo infrarroja	−65°C	00:15	Presencia de una extensa cobertura nubosa fría y elevado grado de organización del sistema.
Máxima relación entre ejes	0.90	04:15	Mayor organización geométrica y configuración circular del sistema.
Duración aproximada del sistema	11 horas	—	Persistencia temporal característica de un Complejo Convectivo de Mesoescala.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió analizar la evolución espacio-temporal de un sistema convectivo desarrollado sobre la Amazonía peruana mediante el uso de imágenes satelitales en el infrarrojo térmico, cumpliendo satisfactoriamente con los objetivos planteados y proporcionando una caracterización de sus principales propiedades físicas y geométricas.

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema analizado presentó un comportamiento consistente con el ciclo de vida típico de un CCM, caracterizado por una fase inicial de desarrollo, una etapa de madurez con máxima organización espacial y una fase final de disipación asociada a una disminución progresiva de la cobertura nubosa fría y de la organización del sistema.

La evolución del área mostró un crecimiento progresivo desde aproximadamente 45,000 km² hasta valores cercanos a 215,000 km², reflejando un importante grado de organización espacial y expansión horizontal del sistema. Asimismo, la evolución de la relación entre el eje menor y el eje mayor evidenció una tendencia hacia configuraciones más compactas y aproximadamente circulares durante la fase madura, en concordancia con los criterios morfológicos descritos en la literatura para este tipo de sistemas convectivos organizados.

Por otro lado, las temperaturas mínimas de brillo infrarrojo del tope nuboso, cercanas a -65°C , fueron consistentes con la presencia de una extensa cobertura nubosa fría y con un elevado grado de organización del sistema convectivo durante la fase madura del evento.

El análisis conjunto de las variables estudiadas permitió confirmar que el sistema convectivo analizado cumple con las principales características morfológicas y temporales de un Complejo Convectivo de Mesoescala, validando su identificación mediante criterios satelitales infrarrojos establecidos en la literatura especializada.

Asimismo, los resultados obtenidos evidencian que las imágenes satelitales infrarrojas geoestacionarias constituyen una herramienta adecuada para el monitoreo y análisis de sistemas convectivos organizados en regiones tropicales con limitada disponibilidad de observaciones meteorológicas convencionales, como la Amazonía peruana. El uso de información satelital permitió identificar y analizar la evolución espacio-temporal del sistema convectivo mediante parámetros físicos y geométricos asociados a su organización y persistencia temporal.

Finalmente, el presente estudio representa un análisis exploratorio basado exclusivamen-

te en información satelital infrarroja, por lo que futuras investigaciones podrían incorporar información complementaria proveniente de reanálisis atmosféricos, perfiles atmosféricos y productos de precipitación satelital, con el fin de profundizar en la comprensión de los mecanismos físicos asociados a la formación y evolución de los Complejos Convectivos de Mesoescala sobre la Amazonía peruana.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chen, X., Leung, L. R., Feng, Z., y Yang, Q. (2023). Environmental controls on mcs lifetime rainfall over tropical oceans. **Geophysical Research Letters**, 50(8). doi:[10.1029/2023GL102xxx](https://doi.org/10.1029/2023GL102xxx).
- Feng, Z., Leung, L. R., Houze Jr, R. A., Hagos, S., Hardin, J., Yang, Q., Han, B., y Fan, J. (2018). Structure and evolution of mesoscale convective systems: Sensitivity to cloud microphysics in convection-permitting simulations over the united states. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, 10(7):1470–1494.
- Ferreira, V. y Anabor, V. (2015). Climatologia de Sistemas Convectivos de Mesoescala ocurridos sobre a América do Sul no período de 2005 a 2006. **Ciência e Natura**, 37(1):17–21.
- Hillger, D. W. y Schmit, T. J. (2009). The goes-13 science test. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 90(5):592–597.
- Houze, R. A. (1994). **Cloud Dynamics**, volumen 53. Elsevier.
- Houze, R. A. (2004). Mesoscale convective systems. **Reviews of Geophysics**, 42(4).
- Houze, R. A. (2014). **Cloud dynamics**, volumen 104. Academic press.
- Kidder, S. Q. y Vonder Haar, T. H. (1995). **Satellite meteorology: an introduction**. Gulf Professional Publishing.
- León-Cruz, J. F. y Pineda-Martínez, L. F. (2021). Eventos meteorológicos extremos en la zona metropolitana de guadalajara, jalisco. En Hernández, J. C. M., Sosa, E. G., Rodríguez, C. M. W., y Martínez, O. F., editores, **Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socio-ecológicos**. México.
- Maddox, R. A. (1980). Mesoscale convective complexes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, pp. 1374–1387.
- Martín, L. F., Esteban Jódar, L. d., y Riosalido Alonso, R. (1996). Observación de un vórtice generado por un sistema convectivo de mesoescala en el interior peninsular.
- Molina, J. J. C. (2000). Los sistemas convectivos de mesoescala y su influencia en la españa mediterránea. **Papeles de Geografía**, (32):29–44.

- Moncrieff, M. W. (2004). Analytic representation of the large-scale organization of tropical convection. **Journal of the Atmospheric Sciences**, 61(13):1521–1538.
- Poveda, J. G., Zuluaga Arias, M. D., y Mejía Valencia, J. F. (2005). Diagnóstico de sistemas convectivos de mesoescala sobre Colombia durante 1998-2002.
- Quispe, N., Villanueva, J. G., y Avalos, G. (2009). Evaluación del complejo convectivo a mesoescala en el Perú, caso 14 de noviembre del 2003. En **Anales Científicos**, volumen 70, pp. 19–29. Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Roca, R., Aublanc, J., Chambon, P., Fiolleau, T., y Viltard, N. (2014). Robust observational quantification of the contribution of mesoscale convective systems to rainfall in the tropics. **Journal of Climate**, 27(13):4952–4958.
- Rogers, R. y Yau, M. (1989). A short course in cloud physics. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, 45:619.
- Rotunno, R., Klemp, J. B., y Weisman, M. L. (1988). A theory for strong, long-lived squall lines. **Journal of Atmospheric Sciences**, 45(3):463–485.
- Salinas, C. R., Fernández Rojas, W., Gutiérrez Camacho, J. A., y Zárate Hernández, E. (2001). Análisis de un sistema convectivo de mesoescala que afectó el Paraguay el 3 de febrero del 2001.
- Schumacher, C. R. y Rasmussen, K. L. (2020). The formation, character and changing nature of mesoscale convective systems. **Nature Reviews Earth & Environment**, 1:301–317. doi:[10.1038/s43017-020-0057-7](https://doi.org/10.1038/s43017-020-0057-7).
- Velasco, I. (1994). **Complejos convectivos de mesoescala en Sud América**. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Velasco, I. y Fritsch, J. M. (1987). Mesoscale convective complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 92(D8):9591–9613.
- Wallace, J. M. y Hobbs, P. V. (2006). **Atmospheric Science: An Introductory Survey**. Elsevier, Amsterdam, 2nd edición.
- Weisman, M. L. y Klemp, J. B. (1986). Characteristics of isolated convective storms. En **Mesoscale meteorology and forecasting**, pp. 331–358. Springer.
- Yao, X., Zhang, H., Ma, J., Shi, D., Wang, W., y Wang, G. (2022). Characteristics of newly formed mesoscale convective systems during the abnormal precipitation over the Yangtze River basin from June to July, 2020. **Atmospheric Science Letters**, 23(10):e1114.