

Algoritmo de identificación de nubes de ceniza volcánica en imágenes satelitales - Parte 1: Sensor VIIRS

Nota Técnica SMN 2021-116

Diana Rodríguez¹, Luciano Vidal¹ y Soledad Osores²

¹Dirección de Productos de Modelación Ambiental y de Sensores Remotos, Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios

²Transporte de Aerosoles, Dirección Nacional de Pronósticos y Servicios para la Sociedad

Diciembre 2021

Información sobre Copyright

Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.

La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.

Resumen

La dispersión de cenizas volcánicas en la atmósfera, originadas por erupciones o por resuspensión posterior de depósitos de ceniza volcánica, provoca impactos ambientales y afecta las actividades humanas a distintas escalas. A través de sensores remotos montados a bordo de satélites es posible el monitoreo y seguimiento de las nubes de ceniza volcánica. En este trabajo se presenta un ensayo de metodología satelital utilizando tres bandas infrarrojas del sensor VIIRS a bordo del satélite NOAA-20 para la clasificación de píxeles con ceniza volcánica tomando como caso de estudio la erupción del Volcán Ubinas para el día 19 de septiembre del 2019 en Perú. Estos resultados podrían contribuir como herramienta de análisis y verificación en el Centro de Aviso de Cenizas Volcánicas Buenos Aires (VAAC por sus siglas en inglés).

Abstract

The dispersion of volcanic ash in the atmosphere, caused by eruptions or subsequent resuspension of volcanic ash deposits, causes environmental impacts and affects human activities at different scales. Through remote sensors mounted on board satellites, it is possible to monitor and track volcanic ash clouds. This Technical Report presents a satellite based algorithm using three infrared bands of the VIIRS sensor on board the NOAA-20 satellite for the classification of pixels with volcanic ash, taking as a case study the eruption of the Ubinas Volcano on September 19, 2019 in Peru. These results could contribute as a tool for analysis and verification in the Buenos Aires Volcanic Ash Advisory Center (VAAC).

Palabras clave: ceniza volcánica, clasificación, satélite, NOAA-20, VIIRS.

Citar como:

Rodriguez. D., L. Vidal y S. Osores, 2021: Algoritmo de identificación de nubes de ceniza volcánica en imágenes satelitales - Parte 1: sensor VIIRS. Nota Técnica SMN 2021-116.

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas la navegación aérea ha experimentado periodos de gran perturbación debido a la erupción de volcanes cuyas cenizas fueron transportadas por los vientos a regiones atravesadas por rutas aéreas. Las nubes de ceniza volcánica afectan el tránsito aéreo nacional e internacional, ya que representan un riesgo a la seguridad aérea pudiendo producir la cancelación de cientos de vuelos incluso a miles de kilómetros del volcán (Guffanti y otros, 2010). Por otro lado, la caída de ceniza volcánica puede afectar el normal funcionamiento de los aeropuertos más cercanos al volcán. En Argentina, en el año 2011, el aeropuerto internacional de la ciudad de Bariloche, en la provincia de Rio Negro, se mantuvo cerrado aproximadamente por siete meses debido a la caída de ceniza volcánica producto de la erupción del Cordón Caulle (Elissondo y otros, 2016).

Es así que la detección temprana de nubes de cenizas volcánicas se ha convertido en un importante objetivo para la vigilancia del espacio aéreo. El objetivo principal es minimizar los peligros que plantean las cenizas volcánicas que se desplazan hacia las rutas aéreas (Casadevall y otros, 1999; Guffanti y otros, 2005). Debido al aumento del tráfico aéreo, las nubes de ceniza volcánica son una fuente importante de riesgo para la aviación (Casadevall 1994a y 1994b; Casadevall y otros, 1996; Miller y Casadevall, 1999; Prata 2009; Prata y Tupper, 2009).

Sensores a bordo de satélites de órbita terrestre baja como el radiómetro avanzado de muy alta resolución AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) o el espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) se han utilizado ampliamente para detectar ceniza volcánica por su alta resolución espacial a través de su señal en el infrarrojo térmico (Rose y otros, 2001; Dean y otros, 2003; Tupper y otros, 2004).

A lo largo de estas últimas décadas se han desarrollado a nivel internacional diversas metodologías combinando bandas térmicas para la clasificación de ceniza volcánica utilizando diferentes instrumentos a bordo de distintos satélites para distintos eventos de erupciones volcánicas como los volcanes Hekla en Islandia y el Cleveland en Alaska (Watson y otros, 2004), Eyjafjallajökull en Islandia y Soufriere Hills en Montserrat, Reino Unido (Pavolonis y otros, 2013) y Monte Etna en Italia (Marchesse y otros, 2021), entre otros.

A nivel local, Osorey y otros (2015) y Rodríguez y otros (2019) exploraron metodologías de clasificación de ceniza volcánica basadas en técnicas de diferencia de bandas de temperatura de brillo (BTD, del inglés *Brightness Temperature Difference*) entre 10.8 μm y 12 μm para su detección basados en Prata 1989 a,b) en combinación con la temperatura de la superficie terrestre. En dichos trabajos se estudió la utilización de diferentes umbrales para la detección de ceniza durante las erupciones del Complejo volcánico Puyehue Cordón Caulle en 2011 y Calbuco en 2015.

El objetivo de la presente Nota Técnica es proporcionar una metodología mejorada para la clasificación de píxeles de ceniza volcánica a partir de 3 bandas térmicas basada en satélites polares para una posterior automatización. El análisis se centra en la nube de ceniza asociada a la erupción del Volcán Ubinas (Perú) ocurrida el día 19 de julio de 2019.

2. DATOS

El sistema de satélites polares conjuntos (JPSS¹, por sus siglas en inglés) de la NOAA proporciona observaciones globales que contribuyen en la predicción y monitoreo de eventos severos como las erupciones volcánicas. Actualmente se encuentran en órbita el satélite Suomi National Polar-orbiting Partnership (S-NPP², por sus siglas en inglés) y el NOAA-20³, anteriormente conocido como JPSS-1. Estos atraviesan el Ecuador unas 14 veces al día en la órbita de la tarde para proporcionar una cobertura global completa dos veces al día. Cada satélite incluye cuatro instrumentos de última generación entre los que se encuentran la sonda de microondas de tecnología avanzada ATMS⁴, la sonda infrarroja Cross-Track CrIS⁵, el conjunto de radiómetros de imágenes infrarrojas visibles VIIRS⁶ y el perfilador y mapeador de ozono OMPS⁷.

Para el desarrollo de esta Nota Técnica se utilizaron datos del satélite NOAA-20 del 19 de julio del 2019 a las 17:56 UTC. En particular se emplearon datos del sensor VIIRS con resolución moderada (M-Band⁸) en el formato de registro de datos del sensor (SDR⁹). Los SDRs (o Nivel 1b) son datos de radiancia y reflectancia calibrados y geocalizados producidos en base a los registros de datos sin procesar (RDR, por sus siglas en inglés) cuya resolución espacial es de 750 metros en el nadir. En la Tabla 1 se muestra el detalle de las bandas utilizadas. Las mismas fueron descargadas a través del sitio web de NOAA CLASS¹⁰. Por otra parte, se inspeccionó el dato de nivel de confianza de ceniza volcánica (Ash Confidence, por sus siglas en inglés) del producto VIIRS Volcanic Ash Detection and Height (EDR)¹¹ del mismo satélite, para el mismo día y hora. Para más detalles ver Rodríguez y Vidal (2020). La lectura, procesamiento y visualización de los datos fue realizada con el software McIDAS- V¹².

Tabla 1: Descripción de las bandas del sensor VIIRS.

Bandas M (VIIRS SDR)	Longitud de onda central (μm)	Resolución espacial al nadir (m)
M3	0.488	750
M4	0.555	
M5	0.672	
M14	8.55	
M15	10.763	
M16	12.013	

¹ <https://www.jpss.noaa.gov/>

² https://www.nasa.gov/mission_pages/NPP/main/index.html

³ <https://www.nesdis.noaa.gov/current-satellite-missions/currently-flying/joint-polar-satellite-system>

⁴ <https://www.jpss.noaa.gov/atms.html>

⁵ <https://www.jpss.noaa.gov/cris.html>

⁶ <https://www.jpss.noaa.gov/viirs.html>

⁷ <https://www.jpss.noaa.gov/omps.html>

⁸ <https://ncc.nesdis.noaa.gov/documents/documentation/viirs-sdr-dataformat.pdf>

⁹ <https://ncc.nesdis.noaa.gov/documents/documentation/viirs-users-guide-tech-report-142a-v1.3.pdf>

¹⁰ <https://www.avl.class.noaa.gov/saa/products/welcome>

¹¹ <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C01441>

¹² <https://www.ssec.wisc.edu/mcidas/software/v/>

3. METODOLOGÍA

Guéhenneux y otros (2015) desarrollaron un algoritmo para la detección automática de nubes de ceniza volcánica a partir de datos del sensor SEVIRI¹³ a bordo del satélite geostacionario Meteosat de Segunda Generación (MSG¹⁴). El método se basa en tres bandas a partir de la combinación de dos BTD: $11 \mu\text{m} \text{ menos } 12$ y $8.7 \mu\text{m} \text{ menos } 11 \mu\text{m}$. Luego, sobre estas dos BTDs, los autores aplican una serie de umbrales para obtener la clasificación final.

Siguiendo dicha metodología, se adaptó la misma para el sensor VIIRS. Para ello se utilizaron los canales M14 ($8.55 \mu\text{m}$), M15 ($10.763 \mu\text{m}$) y M16 ($12.013 \mu\text{m}$) para confeccionar las dos BTD: $\text{BTD}_{\text{M15-M16}}$ y $\text{BTD}_{\text{M14-M15}}$. Además se generaron los compuestos RGB Color Verdadero (Fig. 1) y Ceniza¹⁵ (Fig. 2). Para determinar los umbrales a utilizar en la clasificación, se inspeccionaron transectas en diferentes regiones de la nube de ceniza volcánica (ej., donde se observaba translúcida u opaca).

A partir de dichos umbrales se identificaron los píxeles con presencia de ceniza, y para su clasificación se utilizó un algoritmo booleano (Verdadero/Falso) basado en las BTDs de las tres bandas infrarrojas mencionadas anteriormente.

Se realizaron 3 experimentos de clasificación. El primero, se basa en el método clásico propuesto por Prata (1989 a y b) denominado “*split windows*” que se basa en una diferencia de temperatura de brillo de dos canales térmicos (11 y $12 \mu\text{m}$; BTD_{11-12} ; en adelante M2B) que permite distinguir partículas de agua y/o hielo de partículas de ceniza volcánica. El resultado es una BTD negativa en zonas con partículas de ceniza, mientras que para regiones con partículas de agua y/o hielo la BTD_{11-12} es positiva. Sin embargo, algunos problemas relacionados a esta técnica pueden limitar su uso para la detección automática de ceniza en tiempo real como lo han documentado numerosos trabajos (Simpson y otros, 2000; Prata y otros, 2001; Yu y otros, 2002; Watkin, 2003; Pergola y otros, 2004; Pavolonis y otros, 2006). Entre algunas de las limitaciones que se producen se encuentra la subestimación de la señal ($\text{BTD}_{11-12} > 0$) o señal negativa pérdida y la sobrestimación de la señal ($\text{BTD}_{11-12} < 0$) o señal falsa negativa. La subestimación de la señal suele suceder en entornos fríos con temperaturas menores a 220K donde las partículas de ceniza volcánica actúan como núcleos de condensación de hielo y que es típica de nubes semitransparentes con partículas de hielo. Por su parte, la sobreestimación de la señal puede suceder en alguno de los siguientes casos:

1. Cuando la señal es similar a la generada por una nube de polvo. En este caso para ayudar a determinar si ésta es de origen volcánico o de polvo mineral se podría implementar un método siguiendo la trayectoria de la nube (Simpson y otros, 2010).
2. En suelos desérticos y ricos en cuarzo (Barton y Takashima, 1986) y bajo condiciones atmosféricas secas y sin nubosidad, la radianza medida por el sensor en el infrarrojo depende de las características del suelo. En estas condiciones, la emisividad de la superficie produce una señal de $\text{BTD}_{11-12} < 0$.
3. Durante noches con cielo despejado, cuando el suelo libera calor acumulado durante el día, se produce una inversión térmica en las capas cercanas a superficie que conllevan a valores de BTD_{11-12} negativos (Platt y Prata, 1993).
4. Cuando los topes de nubes convectivas sobrepasan la tropopausa, la inversión de temperatura produce una señal de BTD_{11-12} negativa (Potts y Ebert, 1996).

¹³ <https://www.eumetsat.int/seviri>

¹⁴ <https://www.eumetsat.int/meteosat-second-generation>

¹⁵ https://rammb.cira.colostate.edu/training/visit/quick_guides/GOES_Ash_RGB.pdf

Con el objetivo de minimizar el efecto de algunas de estas limitaciones, los otros dos experimentos combinan el método anterior con la BTD entre las bandas de 8.7 y 11 μm (Pavolonis, 2010; Pavolonis y Sieglaff, 2010; Francis y otros, 2012; Guéhenneux y otros, 2015) donde la presencia de píxeles contaminados con cenizas viene dada por una $BTD_{8.7-11}$ positiva. La Figura 1 corresponde a la composición RGB VIIRS de color verdadero para la cual se utilizaron las bandas M5 en el rojo, M3 en el verde y M4 en el azul. El triángulo en rojo corresponde a la ubicación del volcán Ubinas en Perú. En la misma se observa la nube de ceniza volcánica, al sudeste del volcán y en color marrón oscuro, que en algunos lugares se confunde con el suelo debido al poco contraste que existe entre éste y la nube de ceniza. Al este se distingue la nube de ceniza (en color marrón más claro) que se superpone a la nubosidad meteorológica (en color blanco).

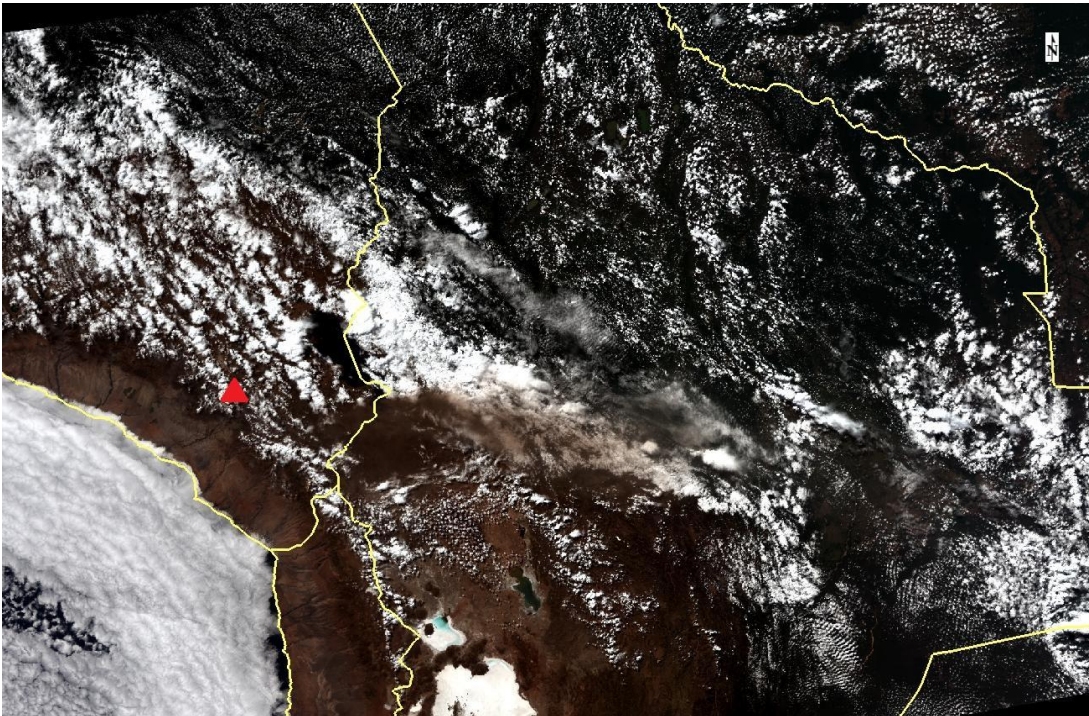


Fig. 1 Imagen correspondiente al producto composición RGB Color Verdadero [R: banda M4 (0.550 μm); G: banda M5 (0.672 μm); B: banda M6 (0.746 μm)]. Los datos fueron captados por el sensor VIIRS a bordo del satélite NOAA-20 para el día 19 de julio de 2019 a las 17:56 UTC. La ubicación del Volcán Ubinas se indica con un triángulo rojo.

La Figura 2 corresponde al producto de RGB Ceniza que se utilizó para detectar en forma visual la presencia de ceniza volcánica. Se utilizó la combinación de bandas del RGB Ceniza para el satélite GOES-16¹⁶. Posteriormente se superpuso un polígono (color azul) que se digitalizó manualmente y que corresponde al área determinada con ceniza volcánica en forma visual que se considerará como la “verdad” para evaluar los experimentos. En la imagen se observa la nube de ceniza volcánica en tonos que van desde el magenta oscuro a más claro, el dióxido de azufre (SO_2) en verde claro, la mezcla de partículas de ceniza y SO_2 en amarillo y nubes altas compuestas por partículas de hielo en tonos de marrón.

¹⁶ https://rammb.cira.colostate.edu/training/visit/quick_guides/GOES_Ash_RGB.pdf

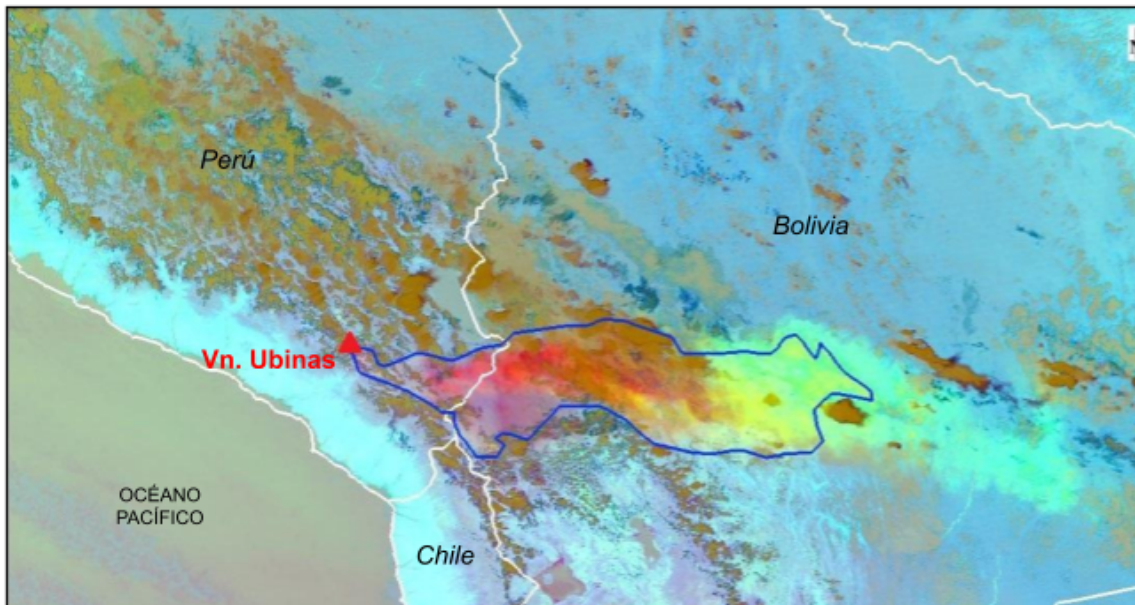


Fig. 2 Ídem Fig. 1 pero para el producto composición RGB Ceniza. La ubicación del Volcán Ubinas se indica con un triángulo rojo. En contorno azul se marca el borde de la nube de ceniza volcánica determinado visualmente.

4. RESULTADOS

4.1 Transectas

La inspección de segmentos o transectas de las $BTD_{M15-M16}$ y $BTD_{M14-M15}$ permitió definir los umbrales más acordes para el proceso de clasificación. Para determinar los sitios de interés donde realizar las transectas se utilizaron los productos RGB Color Verdadero (Fig. 1) y Ceniza (Fig. 2). Se encontraron lugares donde los valores de la $BTD_{M15-M16}$ toman valores negativos y son falsos positivos (no corresponden a ceniza) y otros donde la $BTD_{M14-M15}$ toma valores negativos y están contaminados por cenizas. Muchas veces se produce una sobreestimación del área asociada a la nube de ceniza cuando el suelo es desértico o rico en cuarzo (Barton y Takashima, 1986). En nuestro caso, el suelo es árido, el contraste con el fondo es menor y la $BTD_{M15-M16}$ toma valores negativos en algunas regiones. Si el contraste con el fondo fuese mayor (o sea un fondo con vegetación, por ejemplo), no se notaría la sobreestimación.

La Figura 3 corresponde a $BTD_{M15-M16}$ en la cual se observan valores en el rango comprendido entre $-4.94K$ (negro) a $10.25K$ (blanco). Los tonos más oscuros (negro) corresponden a valores negativos que en general corresponden a ceniza volcánica.

La Figura 4 corresponde a $BTD_{M14-M15}$ en la cual se observan valores en el rango comprendido entre $-14.9K$ (negro) y $6.2K$ (blanco). Los tonos más oscuros (negro) corresponden a valores negativos que en general corresponden a la presencia de SO_2 .

En ambas figuras se indican las transectas T1, T2 y T3 que fueron tomadas para la determinación de los umbrales a ser utilizados en el proceso de clasificación. Las mismas están trazadas por una línea recta (amarilla) que va desde el punto A al punto B.

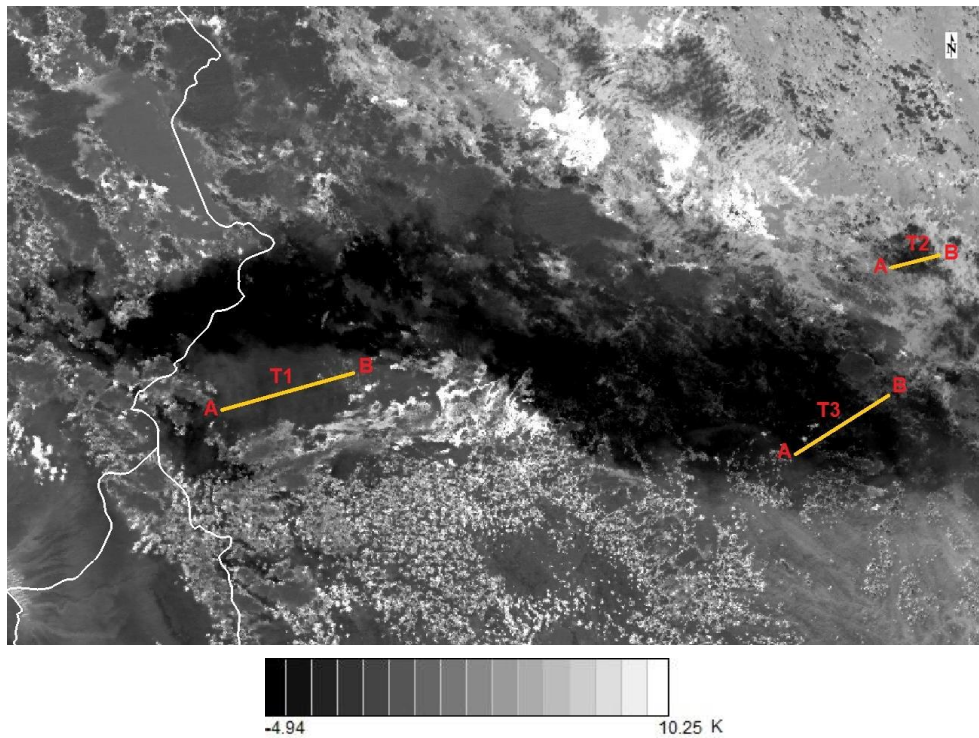


Fig. 3 Imagen correspondiente a la diferencia de temperatura de brillo entre las bandas M15 ($10.763 \mu\text{m}$) y M16 ($12.013 \mu\text{m}$) del satélite NOAA-20 para el día 19 de septiembre de 2019 a las 17:56 UTC. En la misma se indican en color amarillo las transectas analizadas T1, T2 y T3. Con las letras A y B se indica el inicio y fin de la transecta, respectivamente.

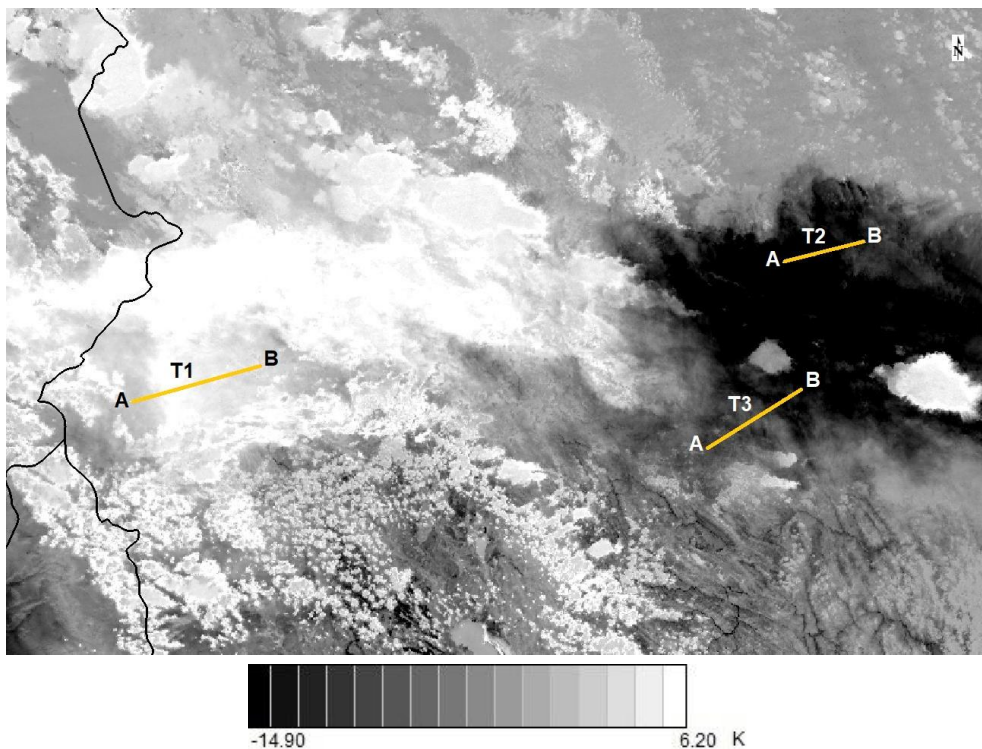


Fig. 4 Ídem Fig. 3 pero para la diferencia de bandas M14 ($8.55 \mu\text{m}$) y M15 ($10.763 \mu\text{m}$).

Las Figuras 5, 6 y 7 corresponden a los perfiles de las transectas T1, T2 y T3 respectivamente.

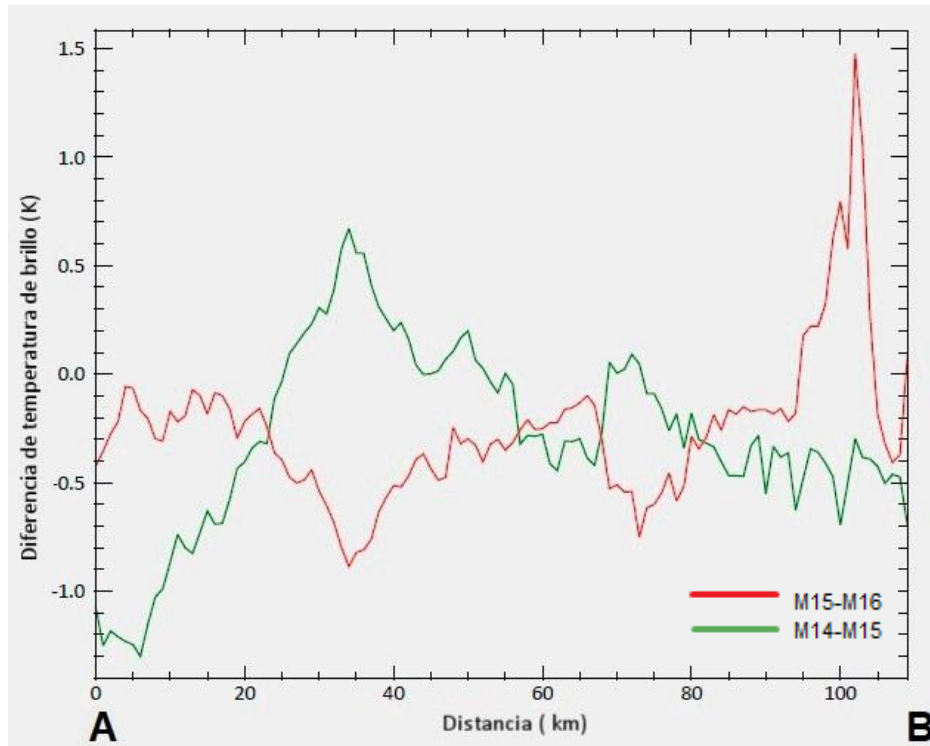


Fig. 5 Perfil de BTD a lo largo de la transecta T1 como se muestra en las Fig. 3 y 4. La curva roja corresponde a valores de la $BTD_{M15-M16}$ mientras que la curva verde a la $BTD_{M14-M15}$. En el eje Y se muestran los valores de diferencia de temperatura de brillo expresados en K y en el eje X la distancia expresada en km.

La Figura 5 muestra los valores de las BTDs a lo largo de la transecta T1 que fue tomada en una zona donde, de acuerdo a la imagen composición RGB Color Verdadero (Fig. 1), se confunde con otras superficies que tienen reflectancia similar y la nube se observa opaca, sin embargo el producto composición RGB Ceniza (Fig. 2) indica la presencia de partículas de ceniza volcánica (en tonalidades de magenta claro) con distintos niveles de intensidad. Se observa que desde el punto A hasta 21.5 km aproximadamente los valores de ambas BTDs son menores a cero con un mínimo de -1.2K para la $BTD_{M14-M15}$ (verde) y de -0.6K $BTD_{M15-M16}$ (roja). Esta región en la composición RGB Ceniza se observa en color magenta claro. A partir de los 21.5 km se invierte la curva y se observan para la $BTD_{M14-M15}$ valores mayores a -1.2K con un máximo de +0.57K y para la $BTD_{M15-M16}$ valores menores a cero con un mínimo de -0.9K. Esta región adquiere tonalidades magenta más oscuras en la composición RGB Ceniza (Fig. 2). A partir de los 55 km aproximadamente hasta el punto B las curvas se invierten sucesivamente y se observan valores menores a +0.1K para la $BTD_{M14-M15}$ y menores a 1.45K para la $BTD_{M15-M16}$. Esta región toma tonalidades de magenta más claro en la composición RGB Ceniza que la región anterior.

La Figura 6 corresponde al perfil de BTDs para la transecta T2 que fue tomada en una región donde la nube de ceniza en la imagen composición RGB Color verdadero (Fig. 1) se observa translúcida, mientras que en el producto RGB Ceniza (Fig. 2) se presenta en amarillo claro, indicando la presencia de partículas de ceniza mezcladas con SO_2 . La curva verde toma valores negativos a lo largo de toda la transecta con un mínimo de -9K. Mientras que la curva roja presenta valores menores a +3.55 K con un mínimo de -1K.

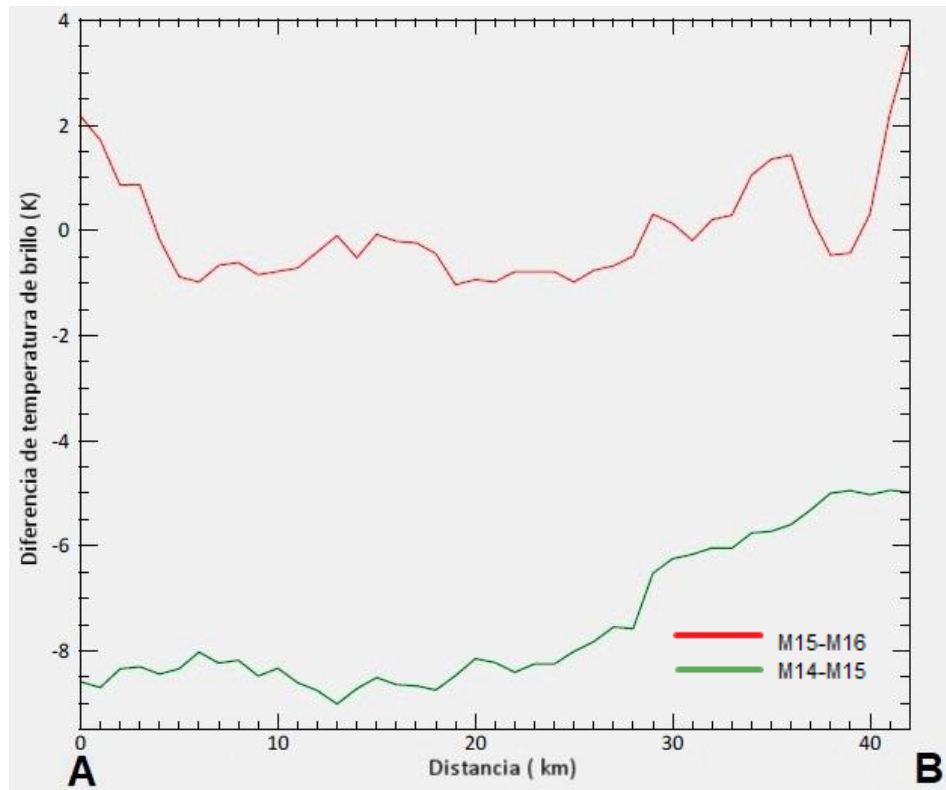


Fig. 6 Idem Fig. 5 pero para la transecta T2.

La Figura 7 corresponde a la transecta T3 que fue tomada en una región donde la nube de ceniza en la imagen composición RGB Color Verdadero (Fig. 1) se observa opaca y próxima al extremo A y luego translúcida cercana al extremo B, y en el producto RGB Ceniza (Fig. 2) en amarillo claro con distintas intensidades, indicando la presencia de partículas de ceniza mezcladas con SO_2 . Ambas curvas toman valores negativos a lo largo de la transecta. Se observan desde el punto A hasta 28.5 km aproximadamente, valores menores a -3.8K con un mínimo de -5K para la curva verde ($\text{BTD}_{\text{M14-M15}}$) y valores menores a -0.8 con un mínimo de -2.3K para la curva roja ($\text{BTD}_{\text{M15-M16}}$). Para esa región la composición RGB Ceniza muestra tonalidades de amarillo claro y en el producto RGB Color Verdadero la nube es marrón y opaca. Desde los 28.5 km hasta el punto B se observan valores menores a -3.8K con un mínimo de -6.8K para la curva verde y valores menores a -0.4K con un mínimo de -2.3K para la curva roja. Para esa región la composición RGB Ceniza toma tonalidades de amarillo más oscuro y en la composición RGB Color Verdadero la nube es translúcida.

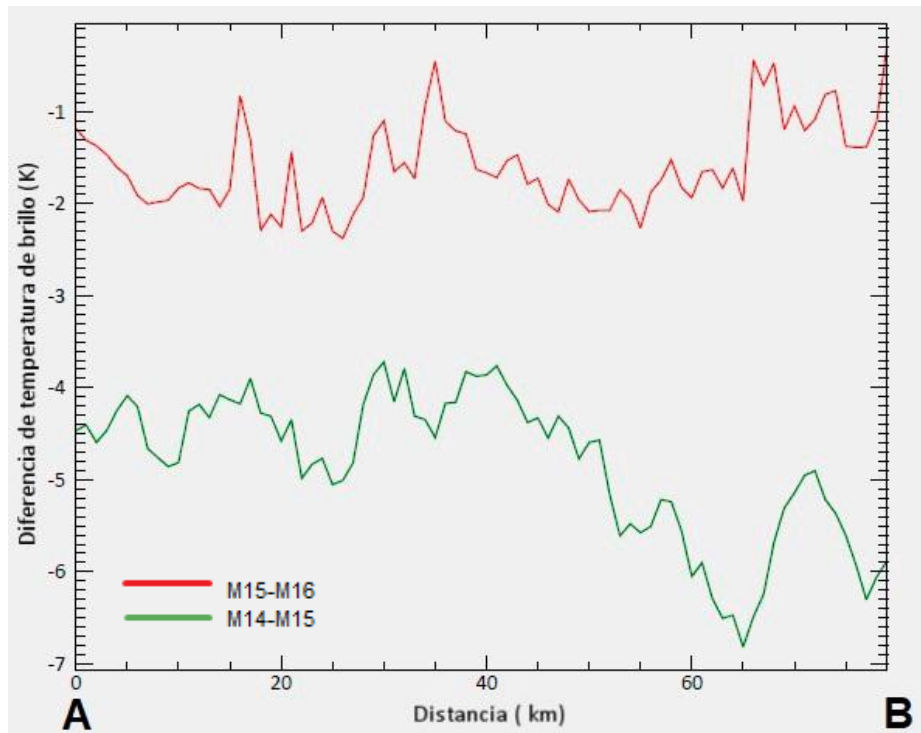


Fig. 7 Idem Fig. 6 pero para la transecta T3.

4.2 Clasificación

En esta sección se muestran los resultados de aplicar los diferentes métodos de clasificación utilizando los umbrales definidos con el análisis de transectas y que incluyen 2 y 3 bandas.

4.2.1 Método de 2 bandas

Como se mencionó en la sección 3. *Metodología*, el experimento resultante de utilizar el método de 2 bandas (en adelante, M2B) se basa en una única BTD e involucra a la diferencia de temperatura de brillo entre los canales M15 (10.763 μm) y M16 (12.013 μm). La clasificación resultante son dos categorías, si la BTD es menor que cero, el píxel se clasifica como *ceniza*, caso contrario (BTD mayor o igual a cero), se lo clasifica como *no ceniza* (Tabla 2). La imagen resultante de esta clasificación se muestra en la Figura 8. En la misma se superpone el polígono de ceniza volcánica obtenido de manera visual, que se considera como "verdad" para la evaluación de los métodos. El color rojo corresponde a los píxeles clasificados por la metodología como "*Ceniza*" y en blanco "*No ceniza*". Es notable cómo este algoritmo clasifica píxeles como "*Ceniza*" siendo nubosidad estratiforme, esto se observa sobre el Océano Pacífico frente a las costas del norte de Chile y sur de Perú (Fig. 1). Asimismo, algunas zonas sobre el suelo también son clasificadas como "*Ceniza*" tanto en el norte de Chile como en el sudeste de Bolivia.

Tabla 2: Umbrales de clasificación de ceniza volcánica correspondientes al método de 2 bandas (M2B).

Categoría	Condición	Código de color
Ceniza	$BTD_{M15-M16} < 0K$	ROJO
No ceniza	$BTD_{M15-M16} \geq 0K$	BLANCO

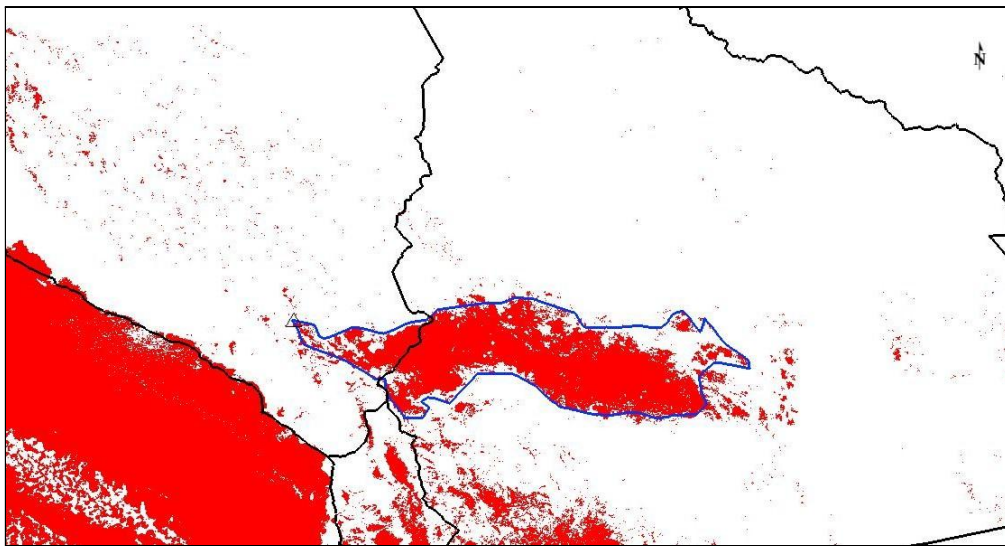


Fig. 8 Imagen resultante de aplicar el método de clasificación de 2 bandas (M2B). En rojo se muestran las zonas donde el clasificador de 2 bandas identifica a los píxeles dentro de la categoría “ceniza”. En contorno azul se marca el borde de la nube de ceniza volcánica determinado por un experto.

4.2.2 Método de 3 bandas

A continuación se presentan dos experimentos, que denominaremos M3B1 y M3B2, en base al método de 3 bandas empleando las $BTD_{M15-M16}$ y $BTD_{M14-M15}$ y los umbrales determinados a partir del análisis de transectas que se utilizan en cada uno. El experimento M3B1 clasifica como “Ceniza” a todos aquellos píxeles cuya $BTD_{M15-M16}$ es menor o igual que $-0.6K$ y la $BTD_{M14-M15}$ es mayor igual que $9K$. Caso contrario, son clasificados en la categoría “No ceniza” (Tabla 3). Los resultados de esta clasificación se muestran en la Figura 9. En color rojo se muestran los píxeles clasificados como ceniza volcánica. Se observa cómo este método mejora la clasificación y reduce las falsas detecciones por fuera del polígono azul (Fig. 8). No obstante, el método 2 no consideró dentro del polígono como ceniza algunos píxeles detectados por el método de 2 bandas. Por otra parte agregó algunos píxeles clasificados como ceniza fuera del polígono.

Tabla 3: Umbrales de clasificación de ceniza volcánica correspondientes al experimento M3B1.

Categoría	Condición 1	Condición 2	Código de color
Ceniza	$BTD_{M15-M16} \leq -0.6K$	$BTD_{M14-M15} \geq 9K$	ROJO
No ceniza	$BTD_{M15-M16} > -0.6K$	$BTD_{M14-M15} < 9K$	BLANCO

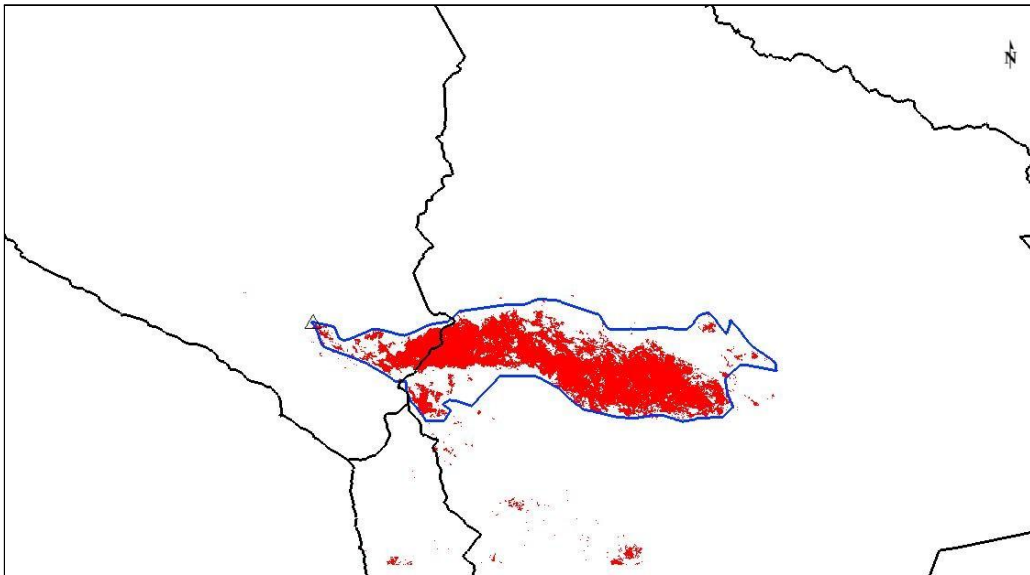


Fig. 9 Imagen resultante de la clasificación con el método M3B1.

Con el objetivo de incluir aquellos píxeles que quedaron fuera de la clasificación en el experimento M3B1 dentro del polígono en comparación con el experimento M2B (Fig. 8), se incluye una nueva condición. El primer paso en la clasificación es igual al experimento M3B1 (categoría “Ceniza 1”; Tabla 4). Luego, se agrega una segunda condición (categoría “Ceniza 2”), donde los píxeles cuya $BTD_{M15-M16}$ es mayor que $-0.6K$ y menor o iguales que $+0.1K$, y la $BTD_{M14-M15}$ es mayor o igual que $-1.2K$, serán clasificados como ceniza. Finalmente, todos los píxeles con la $BTD_{M15-M16}$ menor que $+0.1K$ y la $BTD_{M14-M15}$ menor que $-9K$ son clasificados como “No ceniza” (ver Tabla 4). La imagen resultante del experimento M3B2 se muestra en la Figura 10. En ella se pueden observar las zonas que fueron clasificadas en la categoría “Ceniza 1” en color rojo, mientras que los píxeles que cumplen con la condición dentro de la categoría “Ceniza 2” se muestran en color naranja. En la misma se observa que este experimento incorporó algunos píxeles (dentro del polígono azul) clasificados como “Ceniza 2” que fueron determinados como ceniza por el método M2B (Fig. 8), sin embargo, agregó algunos píxeles por fuera del polígono.

Tabla 4: Umbrales de clasificación de ceniza volcánica correspondientes al método M3B2.

Categoría	Condición 1	Condición 2	Código de color
Ceniza 1	$BTD_{M15-M16} \leq -0.6K$	$BTD_{M14-M15} \geq -9K$	ROJO
Ceniza 2	$-0.6K < BTD_{M15-M16} \leq +0.1K$	$BTD_{M14-M15} \geq -1.2K$	NARANJA
No ceniza	$BTD_{M15-M16} > +0.1K$	$BTD_{M14-M15} < -9K$	BLANCO

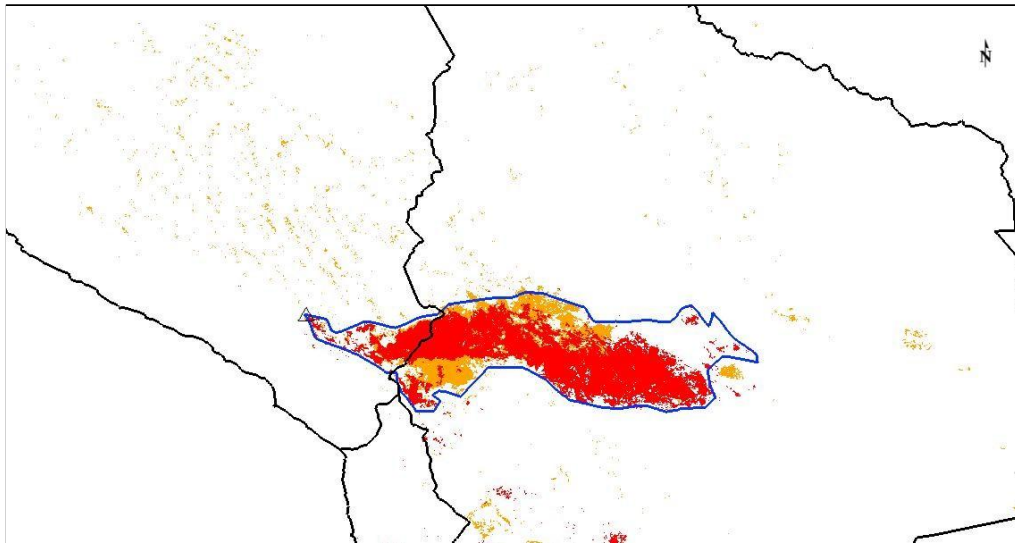


Fig. 10 Imagen resultante de la clasificación con el método M3B2.

Se utiliza un enfoque de tabla de contingencia (Tabla 1) para determinar el desempeño de los pronósticos dicotómicos mediante el cálculo de la

Para cuantificar el desempeño del método de 3 bandas en los dos experimentos discutidos con anterioridad (experimento M3B1 y M3B2) realizamos una comparación con los resultados obtenidos con el método de 2 bandas (experimento M2B). Para ello se utilizó un enfoque de tabla de contingencia como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5: Tabla de contingencia para el análisis de la clasificación.

		OBSERVACIÓN		TOTAL
		SI	NO	
CLASIFICACIÓN	SI	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a+b</i>
	NO	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>c+d</i>
TOTAL		<i>a+c</i>	<i>b+d</i>	<i>a+b+c+d</i>

En la Tabla 5, *a* es el total de píxeles clasificados como ceniza contenidos dentro del polígono definido visualmente, también conocido como “aciertos”; *b* es el total de píxeles clasificados como ceniza pero que no están contenidos dentro del polígono (“falsa alarma”); *c* es la cantidad total de píxeles del polígono no clasificados como ceniza, es decir píxeles “perdidos” o erróneos; y *d* es la cantidad total de píxeles que no fueron clasificados como ceniza de manera correcta (“negativo correcto”). A partir de estos valores (*a*, *b*, *c* y *d*) se pueden calcular los índices POD, FAR y Bias para evaluar la calidad de los métodos de clasificación. Los resultados correspondientes a los tres experimentos se muestran en las Tablas 6 a 8.

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

$$FAR = \frac{b}{a+b} \quad (2)$$

$$Bias = \frac{a+b}{a+c} \quad (3)$$

Tabla 6: Tabla de contingencias para el experimento M2B.

		OBSERVACIÓN		
		SI	NO	TOTAL
CLASIFICACIÓN	SI	105.749	388.675	494.424
	NO	40.493	2.308.989	2.349.482
TOTAL		146.242	2.697.664	2.843.906

Tabla 7: Tabla de contingencias para el experimento M3B1.

		OBSERVACIÓN		
		SI	NO	TOTAL
CLASIFICACIÓN	SI	75.372	2.775	78.147
	NO	70.870	2.694.889	2.765.759
TOTAL		146.242	2.697.664	2.843.906

Tabla 8: Tabla de contingencias para el experimento M3B2.

		OBSERVACIÓN		
		SI	NO	TOTAL
CLASIFICACIÓN	SI	97.469	16.481	113.950
	NO	48.773	2.681.183	2.729.956
TOTAL		146.242	2.697.664	2.843.906

En la Tabla 10 se muestran los tres índices calculados para los tres experimentos realizados. Si bien el método de 2 bandas (experimento M2B) muestra el mejor desempeño en términos de probabilidad de aciertos (POD) con un 72%, la tasa de falsas alarmas es superior y cercana al 80%, con una sobreestimación importante respecto de la clasificación visual. La sobreestimación del experimento M2B reside en las extensas áreas de nubosidad que fueron clasificadas como ceniza. Luego, los dos

experimentos basados en el método de 3 bandas muestran un mejor desempeño en términos de falsas alarmas y bias.

Tabla 10: Resumen de los índices para evaluar la calidad de las clasificaciones.

Experimento	POD	FAR	Bias
M2B	0,72	0,79	3,4
M3B1	0,52	0,04	0,53
M3B2	0,67	0,14	0,78

Por otra parte, comparando los resultados que se observan con la variable de nivel de confianza de ceniza volcánica del gránulo VIIRS del mismo día a la misma hora (Fig. 11), vemos que la clasificación del método M3B2 se ajusta mucho mejor, ya que descarta gran cantidad de falsas alarmas. Por lo tanto, la metodología utilizada con el método de 3 bandas a priori estaría mostrando muy buenos resultados respecto del método tradicional de 2 bandas.

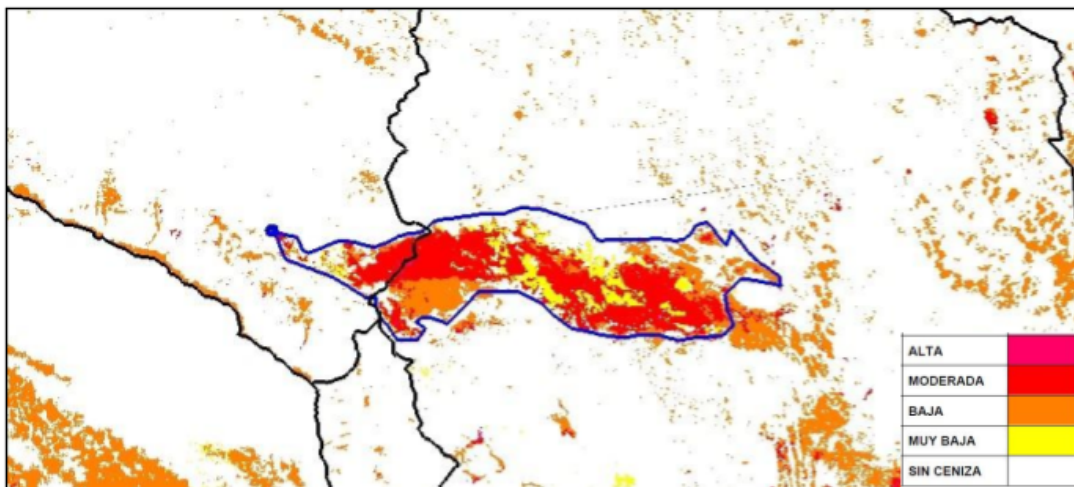


Fig. 11 Imagen correspondiente al producto de nivel de confianza de ceniza volcánica del sensor VIIRS a bordo del satélite NOAA-20 para el día 19 de julio de 2019 a las 17:56 UTC.

5. CONCLUSIONES

En esta Nota Técnica se documentan los resultados de aplicar diferentes algoritmos de clasificación de ceniza volcánica en una imagen satelital VIIRS basados en diferencias de temperaturas de brillo de dos y tres longitudes de onda, variando las condiciones de filtrado con el objetivo de obtener una mejor clasificación de escenas con ceniza.

Los resultados encontrados son alentadores, mostrando que la utilización del método de 3 bandas brinda mejores clasificaciones de escenas con ceniza que el método tradicional de 2 bandas, ya que el primero logra abarcar la mayor parte de los píxeles clasificados visualmente como ceniza al mismo tiempo que

descarta gran parte de las falsas detecciones. En particular, en los dos experimentos basados en las BTDs que involucran las 3 bandas, si bien el experimento M3B1 tiene una tasa de falsas alarmas menor que el experimento M3B2, los porcentajes de acierto son mayores en este último caso.

Entre las dificultades de la escena se encuentra la determinación de valores umbrales de clasificación ya que la señal de las BTDs se amplifica o disminuye debido al poco contraste que suele producirse con el suelo árido y/o desértico característicos de esta región de la Cordillera de los Andes.

Con el objeto de avanzar en una futura implementación del algoritmo de manera automática, es necesario ampliar el número de eventos de modo tal de darle más robustez a los resultados. Además, es importante remarcar que es necesario incluir diferentes zonas geográficas de modo tal de abarcar distintas condiciones de suelo ya que afectan los valores umbrales de clasificación debido al poco contraste entre la nube de ceniza y el suelo árido y/o desértico característico de los Andes en estas latitudes.

REFERENCIAS

Barton, I.J., Takashima, T., 1986: An AVHRR investigation of surface emissivity near Lake Eyre Australia. *Remote Sens. Environ.* 20, 153–163, [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(86\)90020-9](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(86)90020-9).

Casadevall, T.J., 1994a.: The 1989/1990 eruption of Redoubt volcano Alaska: impacts on aircraft operations. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 62 (30), 301–316, [http://dx.doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90038-8](http://dx.doi.org/10.1016/0377-0273(94)90038-8).

Casadevall, T.J., 1994b.: Volcanic ash and aviation safety. *Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety.* USGS Bull 2047, p. 450.

Casadevall, T.J., Delos Reyes, P.J., Schneider, D.J., 1996: The 1991 Pinatubo Eruptions and Their Effects on Aircraft Operations, in *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines.* In: Newhall, C.G., Punongbayan, R.S. (Eds.), University of Washington Press, Seattle, pp. 625–636.

Casadevall, T.J., Thompson, T.B, Fox T., 1999: *World Map of Volcanoes and Principal Aeronautical Features.* USGS Map I-2700, scale 1:34,268,000, reprinted 2001.

Dean, K.G., Dehn, J., Papp, K., Smith, S., Izbekov, P., Peterson, R., Kearney, C., Steffke, A., 2003: Integrated satellite observations of the 2001 eruption of Mt Cleveland Alaska. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 135, 51–73, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2003.12.013>.

Elissondo, M., Baumann, V., Bonadonna, C., Pistolesi, M., Cioni, R., Bertagnini, A., Biass, S., Herrero J. C., Gonzalez, R., 2016: Chronology and impact of the 2011 Cordón Caulle eruption, Chile. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(3), 675-704.

Francis, P.N., Cooke, M.C., Saunders, R.W., 2012: Retrieval of physical properties of volcanic ash using Meteosat: a case study from 2010 Eyjafjallajökull eruption. *J. Geophys. Res.* 117, D00U09, <http://dx.doi.org/10.1029/2011JD016788>.

Guéhenneux, Y., Gouhier, M., Labazuy, P., 2015: Improved space borne detection of volcanic ash for real-time monitoring using 3-Band method. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 293, 25-45.

Guffanti, M., Ewert, J.W., Gallina, G.M., Bluth, G.J.S., Swanson, G.L., 2005: Volcanic-ash hazard to aviation during the 2003–2004 eruption activity of Anatahan volcano Commonwealth of the Northern Mariana Islands. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 146, 241–255, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.12.011>.

Guffanti, M., Casadevall, T.J., Budding, K., 2010: Encounters of aircraft with volcanic ash clouds: a compilation of known incidents, 1953-2009: U.S. Geological Survey Data Series 545.

Marchese, F., Filizzola, C., Lacava, T., Falconieri, A., Faruolo, M., Genzano, N., Mazzeo, G., Pietrapertosa, C., Pergola, N., Tramutoli, V., Neri, M., 2021: Mt. Etna Paroxysms of February–April 2021 Monitored and Quantified through a Multi-Platform Satellite Observing System. *Remote Sensing*. 2021;13(16):3074, <https://doi.org/10.3390/rs13163074>.

Miller, T.P. y Casadevall, T.J., 1999: Volcanic ash hazards to aviation. In: Sigurdsson, H., et al.(Eds.), *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, pp. 915–930.

Osores, S., Toyos, G., Pujol, G., Ruiz, J., Collini, E., Folch, A., 2015: Mass loadings of the 2011 Cordón Caulle volcanic ash clouds. A quantitative comparison between MODIS and numerical simulations. IUGG-IAVCEI General Assembly. Praga.

Pavolonis, M.J., Feltz, W.F., Heidinger, A.K., Gallina, G.M., 2006: A daytime complement to the reverse absorption technique for improved automated detection of volcanic ash. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 23 (11), 1422. <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH1926.1>

Pavolonis, M.J., 2010: Advances in Extracting Cloud Composition Information from Spaceborne Infrared Radiances-A Robust Alternative to Brightness Temperatures. Part I: Theory. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, 1992-2012, doi:10.1175/2010JAMC2433.1 ER.

Pavolonis, M.J. y Sieglaff, J., 2010: GOES-R advanced baseline imager (ABI) algorithm theoretical basis document for volcanic ash: detection and height, version 2.0, report. NOAA Silver Spring (72 pp., available at: http://www.goes-r.gov/products/ATBDs/baselined/Aviation_VolAsh_v2.0_no_color.pdf).

Pavolonis, M.J., Heidinger, A., Sieglaff, J., 2013: Automated retrievals of volcanic ash and dust cloud properties from upwelling infrared measurements, *J. Geophysical Research*, 118(3), 1436-1458.

Pergola, N., Tramutoli, V., Marchese, F., Scaffidi, I., Lacava, T., 2004: Improving volcanic ash cloud detection by a robust satellite technique. *Remote Sens. Environ.* 90, 1–22.

Platt, C.M.R., Prata, A.J., 1993: Nocturnal effects in the retrieval of land surface temperatures from satellite measurements. *Remote Sens. Environ.* 45, 127–136.

Prata, A.J., 1989a: Observations of volcanic ash clouds using AVHRR-2 radiances. *Int. J. Remote Sens.* 10 (4–5), 751–761, <http://dx.doi.org/10.1080/01431168908903916>.

Prata, A.J., 1989b: Radiative transfer calculations for volcanic ash clouds. *Geophys. Res. Lett.* 16 (11), 1293–1296, <http://dx.doi.org/10.1029/GL016i011p01293>.

Prata, A.J., Grant, I.F., 2001: Retrieval of microphysical and morphological properties of volcanic ash clouds from satellite data: application to Mt Ruapehu New Zealand. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 127 (576B), 2153–2179,

Prata, A.J., 2009: Satellite detection of hazardous volcanic clouds and the risk to global air traffic. *Nat. Hazards* 51 (2), 303–324.

- Prata, A.J., Tupper, A., 2009: Aviation hazards from volcanoes: the state of the science. *Nat. Hazards* 51 (2), 239–244.
- Potts, R.J., Ebert, E.E., 1996: On the detection of volcanic ash in NOAA AVHRR infrared satellite imagery. Paper Presented at 8th Australian Remote Sens. Conf., Canberra, 25–29 March 1996.
- Rodríguez, D.M., Bolzi C., Rossi Lopardo, M.S., Osorio, S., Macial, S., 2019: Assay of satellite methodology for volcanic ash classification: Calbuco volcano case. AMS 100 2019 Joint Satellite Conference, September 28 - October 04, 2019 Boston, USA.
- Rodriguez, D. M. y L. Vidal, 2020: Monitoreo de ceniza volcánica con la nueva generación de satélites polares. Nota Técnica SMN 2020-72. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1374>.
- Rose, W.I., Bluth, G.J.S., Schneider, D.J., Ernst, G.G.J., Riley, C.M., Henderson, L.J., McGimsey, R.G., 2001: Observations of Volcanic clouds in their first few days of atmospheric residence: the 1992 eruptions of Crater Peak Mount Spurr volcano Alaska. *J. Geol.* 109(6), 677–694, <http://dx.doi.org/10.1086/323189>.
- Simpson, J.J., Hufford, G., Pieri, D., Berg, J., 2000: Failures in detecting volcanic ash from satellite-based technique. *Remote Sens. Environ.* 72, 191–217, [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00103-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00103-0).
- Tupper, A., Carn, S., Davey, J., Kamada, Y., Potts, R., Prata, F., Tokuno, M., 2004: An evaluation of volcanic cloud detection techniques during recent significant eruptions in the western ‘Ring of Fire’. *Remote Sens. Environ.* 91, 27–46, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.004>.
- Watkin, S.C., 2003: The application of AVHRR data for the detection of volcanic ash in a Volcanic Ash Advisory Centre. *Meteorol. Appl.* 10, 301–311. <http://dx.doi.org/10.1017/S1350482703001063>
- Watson, I. M., Realmuto, V. J., Rose, W. I., Prata, A. J., Bluth, G. J., Gu, Y., Yu, T., 2004: Thermal infrared remote sensing of volcanic emissions using the moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of volcanology and geothermal research*, 135(1-2), 75-89.
- Yu, T., Rose, W.I., Prata, A.J., 2002: Atmospheric correction for satellite-based volcanic ash mapping and retrievals using “split window” IR data from GOES and AVHRR. *J. Geophys. Res.* 107 (D16), 10,1029. <http://dx.doi.org/10.1029/2001JD000706>.

Instrucciones para publicar Notas Técnicas

En el SMN existieron y existen una importante cantidad de publicaciones periódicas dedicadas a informar a usuarios distintos aspectos de las actividades del servicio, en general asociados con observaciones o pronósticos meteorológicos.

Existe no obstante abundante material escrito de carácter técnico que no tiene un vehículo de comunicación adecuado ya que no se acomoda a las publicaciones arriba mencionadas ni es apropiado para revistas científicas. Este material, sin embargo, es fundamental para plasmar las actividades y desarrollos de la institución y que esta dé cuenta de su producción técnica. Es importante que las actividades de la institución puedan ser comprendidas con solo acercarse a sus diferentes publicaciones y la longitud de los documentos no debe ser un limitante.

Los interesados en transformar sus trabajos en Notas Técnicas pueden comunicarse con Ramón de Elía (rdelia@smn.gov.ar), Luciano Vidal (lvidal@smn.gov.ar) o Martín Rugna (mrugna@smn.gov.ar) de la Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, para obtener la plantilla WORD que sirve de modelo para la escritura de la Nota Técnica. Una vez armado el documento deben enviarlo en formato PDF a los correos antes mencionados. Antes del envío final los autores deben informarse del número de serie que le corresponde a su trabajo e incluirlo en la portada.

La versión digital de la Nota Técnica quedará publicada en el Repositorio Digital del Servicio Meteorológico Nacional. Cualquier consulta o duda al respecto, comunicarse con Melisa Acevedo (macevedo@smn.gov.ar).