

# El factor geográfico: cómo las condiciones ambientales determinan el control del metano desde el espacio

---

Los satélites están transformando el control del metano a nivel mundial porque ofrecen perspectivas sin precedentes y datos viables para respaldar los esfuerzos de mitigación. Con una cantidad creciente de instrumentos de detección de metano en órbita, una diversa comunidad, que incluye ONG, gobiernos y otros sectores, está cada vez más interesada en integrar los datos satelitales en su trabajo. Este informe funciona como recurso para los nuevos usuarios, ya que los ayuda a utilizar de manera eficaz los datos satelitales identificando regiones en las que las condiciones ambientales pueden afectar la cobertura de datos.

18 de marzo de 2025

Dr Sarah Shannon (Ember) y  
Dr Ioannis Biniotoglou (Clean Air Task Force)

# Contenido

---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Resumen ejecutivo</b>  | <b>4</b>  |
| <b>1. Control de las emisiones de metano</b>  | <b>9</b>  |
| ¿Por qué medir el metano?   | 9         |
| El rol de los satélites en un sistema de observación mundial                                      | 11        |
| <b>2. Condiciones ambientales desafiantes</b>   | <b>16</b> |
| Condiciones ambientales y sus impactos  | 19        |
| Nubosidad   | 19        |
| Rugosidad del terreno   | 21        |
| Elevación solar   | 23        |
| Brillo de la superficie   | 25        |
| Velocidad del viento  | 27        |
| Nuestra metodología   | 28        |
| <b>3. Regiones difíciles de controlar</b>   | <b>30</b> |
| Diferencias entre países en cuanto a la facilidad de control satelital de la producción de carbón | 34        |
| Diferencias nacionales en la facilidad del control satelital de la producción de petróleo y gas   | 36        |
| Estudios de casos prácticos   | 39        |
| <b>4. El camino a seguir</b>  | <b>45</b> |
| Tecnologías alternativas para la medición del metano  | 47        |
| Más allá de las tecnologías específicas   | 48        |
| <b>Metodología</b>  | <b>50</b> |
| <b>Reconocimientos</b>  | <b>57</b> |

# Acerca de

---

Este informe está destinado a ayudar a los gobiernos, los grupos de la sociedad civil y la industria a mejorar su comprensión de las observaciones espaciales del metano, un paso fundamental para combatir el cambio climático.

Hay una creciente cantidad de sensores de metano en órbita alrededor de la Tierra que brindan información sin precedentes sobre las emisiones a nivel mundial. Estos sensores varían desde los que miden metano con una resolución kilométrica hasta los que controlan las emisiones a nivel de la instalación. Los datos permiten una gran variedad de aplicaciones, desde el control eficaz de las emisiones según el país hasta la rápida respuesta a eventos de emisores principales.

Sin embargo, las condiciones ambientales locales pueden afectar la disponibilidad de los datos satelitales en algunos lugares o momentos del año. Los nuevos usuarios de satélites deben estar al tanto de estos efectos y tenerlos en cuenta al considerar cómo utilizar los datos satelitales en sus esfuerzos de mitigación.

En este informe, exploramos la manera en que las condiciones ambientales, como nubosidad y rugosidad del terreno, pueden afectar la disponibilidad de los datos satelitales en diferentes regiones en todo el mundo a lo largo del año.

Brindamos esta información para ayudar a los nuevos usuarios a comprender cómo los factores ambientales pueden afectar la cobertura de datos, por eso destacamos factores que deben tener en cuenta al elegir la estrategia de observación más adecuada para sus necesidades.

Específicamente, trazamos un mapa de las regiones donde el control del metano con satélites podría ser difícil debido a cinco factores: nubosidad, rugosidad del terreno (es decir, regiones montañosas), brillo de la superficie, intensidad del viento y disponibilidad de luz solar. Nos centramos en lugares de extracción de petróleo, gas y carbón para explorar la manera en que los factores ambientales podrían influir en el control del metano en estos puntos específicos de interés.



# Los factores ambientales y su impacto en las observaciones satelitales de metano

Las observaciones de metano desde el espacio están transformando los esfuerzos de mitigación de las emisiones. Una variedad en expansión de sensores satelitales ahora brinda datos adaptados a una gran cantidad de necesidades de los usuarios. Por ejemplo, los cartógrafos de flujo miden el metano en grandes áreas, lo que ayuda a mejorar los inventarios de metano, mientras que los generadores de imágenes de fuentes puntuales aportan datos de alta resolución a nivel de la instalación, y respalda las rápidas acciones de mitigación. Además de la creciente cantidad de sensores, se han realizado esfuerzos significativos para mejorar la accesibilidad a los datos. Los esfuerzos están teniendo éxito, y una gran cantidad de posibles usuarios (incluidos gobiernos, ONG y periodistas) están explorando las maneras de integrar los datos satelitales del metano en su trabajo. Sin embargo, para usar estos datos de manera eficaz, los nuevos usuarios primero deben afrontar los desafíos de comprender las características de cada producto de datos y determinar su pertinencia para las tareas específicas.

Integrar las observaciones de metano desde el espacio con los esfuerzos de mitigación de emisiones es una tarea crucial. Para reducir las emisiones de metano, 157 países han firmado el Global Methane Pledge (Compromiso Global por el Metano), un compromiso voluntario para reducir las emisiones mundiales

de metano en al menos un 30 % para 2030, en comparación con los niveles de 2020. Los instrumentos espaciales de medición del metano son fundamentales para alcanzar este objetivo mundial, ya que ofrecen una nueva comprensión de las emisiones de metano a nivel mundial, aportan transparencia y responsabilidad al proceso y, a menudo, brindan la oportunidad de reparar rápidamente grandes emisiones de metano no intencionales. Sin embargo, a pesar de su gran valor y su posición ventajosa, la eficacia de los satélites se verá limitada en ciertas regiones por factores ambientales como la nubosidad, las condiciones de poca luz durante el invierno y las propiedades del terreno.

Este informe traza un mapa de las variaciones regionales de las condiciones ambientales que pueden hacer que los satélites sean menos efectivos para controlar las emisiones de metano. Destaca que, por ejemplo, muchas regiones de los trópicos se ven afectadas por una nubosidad persistente, mientras que las regiones de latitudes altas reciben bajos niveles de luz durante varios meses, lo que dificulta las observaciones de metano a través de algunos sensores debido a niveles de señal insuficientes. El efecto combinado de estos factores ambientales es que, en determinadas regiones, algunos satélites no podrán observar las emisiones de metano o su eficacia se reducirá considerablemente, en comparación con regiones con condiciones más favorables, analizadas en muchos estudios de prueba de concepto. Esta eficacia reducida puede hacer que determinados productos no sirvan para usos específicos.

El informe también estima que el 30 %, de las infraestructuras de extracción de carbón, petróleo y gas se encuentra en regiones que podrían ser difíciles de observar con instrumentos espaciales debido a la nubosidad, las condiciones de poca luz, las superficies oscuras y el terreno montañoso

“

Los satélites están revolucionando la forma de controlar el metano desde el espacio. A medida que aumenta la cantidad de datos abiertos disponibles por satélite, crece el interés de los usuarios por saber cómo utilizar eficazmente estas mediciones. Este informe examina cómo las condiciones ambientales pueden afectar la detección de metano por satélite, que a veces limitan la cobertura de datos en determinadas regiones. Al explicar estas limitaciones, pretendemos ayudar a los usuarios a seleccionar los datos satelitales más eficaces para su caso de uso. Ampliar la comunidad de usuarios de datos satelitales crea más oportunidades para reducir las emisiones de metano, un paso esencial para frenar el cambio climático.

**Sarah Shannon**

Analista de datos satelitales, Ember



# Puntos clave

---

## 01 **Las condiciones ambientales pueden limitar la capacidad de los satélites para controlar las emisiones**

Las condiciones ambientales como la nubosidad, la velocidad del viento, el brillo de la superficie, el terreno montañoso y las variaciones estacionales en la disponibilidad de luz solar pueden influir en la detección satelital del metano. Estos impactos varían según el sensor, la ubicación y la época del año.

Por ejemplo, en las regiones en latitudes altas, los ángulos bajos del sol durante el invierno reducen la luz disponible para los sensores satelitales, mientras que las superficies oscuras de bosques o cubiertas de nieve reflejan menos luz infrarroja que los satélites utilizan para detectar metano, lo que dificulta el control. Los vientos fuertes pueden dispersar las plumas de metano, y el terreno montañoso puede crear sombras locales, limitando la luz necesaria para la detección. En las áreas tropicales, la nubosidad persistente puede obstruir el control satelital del metano.

La magnitud en la que estos efectos impactan en la detección satelital del metano depende del sensor y el uso previsto de los datos. Por ejemplo, la nubosidad persistente puede limitar los cartógrafos de flujo de área, que miden metano en regiones más grandes, a escala kilométrica, y dificultar potencialmente el control de flujo según el país. Por el contrario, es posible que los sensores satelitales de alta resolución de fuente puntual, que están diseñados para detectar el metano en instalaciones individuales, sigan identificando plumas entre algunas nubes rotas.

---

## 02 **El 30 % del carbón mundial se produce en regiones difíciles de controlar**

Nuestro análisis de la producción mundial de carbón estima que un tercio de las operaciones están ubicadas en regiones donde la detección satelital del metano se ve dificultada por factores ambientales. Por ejemplo, Indonesia, uno de los principales productores de carbón, es un área especialmente desafiante para el control del metano debido a la nubosidad persistente y el terreno accidentado, lo que puede dificultar el uso de algunos productos satelitales en áreas que producen el 84 % de la producción nacional de carbón.

---

---

## 03 **El 29 % del petróleo y el gas en tierra se produce en regiones difíciles de controlar**

Se calcula que alrededor de un tercio de la producción mundial de petróleo y gas en tierra ocurre en regiones con condiciones que dificultan la observación satelital. En estas áreas, que incluyen partes de los Estados Unidos y Canadá, los sistemas de observación deben diseñarse cuidadosamente para considerar estas limitaciones y, posiblemente, depender más de mediciones alternativas para proporcionar una imagen más completa de las emisiones.

---



## 1. Control de las emisiones de metano

# Los satélites harán posible un control eficaz del metano a nivel mundial

---

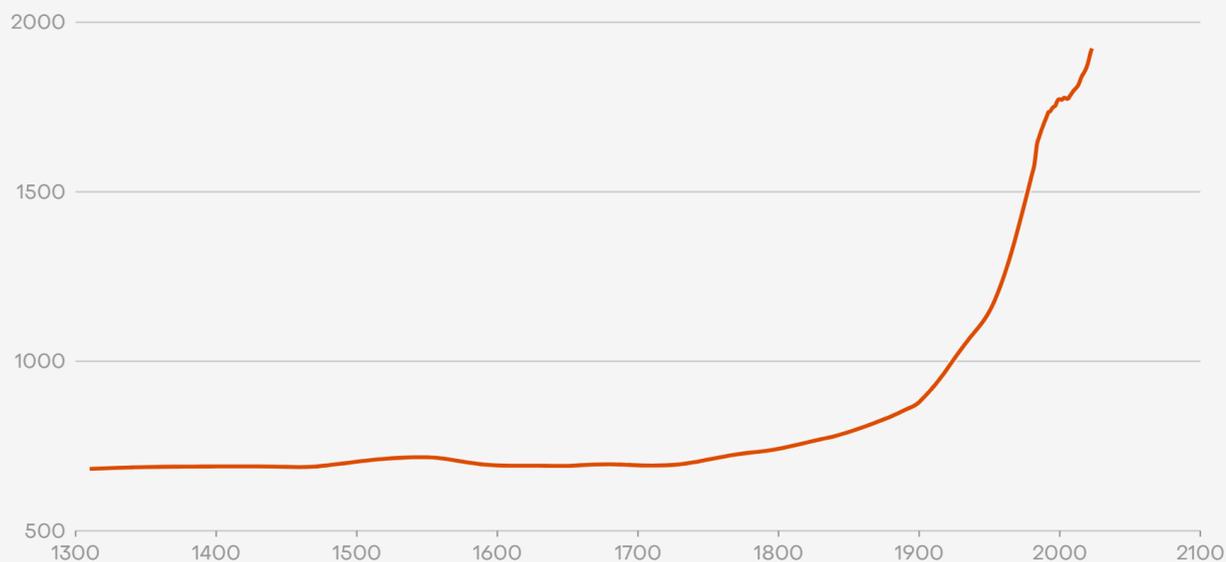
**Las mediciones espaciales de metano están revolucionando la comprensión global de las emisiones de metano y constituirán la base de un sistema global emergente de observación del metano.**

### ¿Por qué medir el metano?

El metano es un potente gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global mucho mayor que el dióxido de carbono, siendo más de [80 veces más potente](#) por tonelada en 20 años y alrededor de 30 veces más potente en 100 años. Las concentraciones de metano han aumentado rápidamente desde la época preindustrial y son responsables de [medio grado \(0.5 °C\)](#) del calentamiento global actual (1.1 °C). Una gran parte de este aumento se debe a las emisiones de algunos sectores económicos, como los [combustibles fósiles \(35 %\), los residuos \(20 %\) y la agricultura \(40 %\)](#).

## Debido a las actividades antropogénicas, las concentraciones atmosféricas de metano han aumentado drásticamente desde principios del siglo XX

Concentraciones de metano en partes por mil millones



Fuente: Datos de 1984 a 2023 – NOAA GML Trends en Atmospheric CH<sub>4</sub>, Datos de 1300 a 1982 – Etheridge et al (1998)

**EMBER**

Para mantener la temperatura de la Tierra por debajo del objetivo de 1.5 °C del Acuerdo de París, es urgente lograr reducciones rápidas de metano en todos los sectores mencionados. Por este motivo, 157 países han firmado el [Global Methane Pledge \(Compromiso Global por el Metano\)](#), un compromiso voluntario de reducir las emisiones mundiales de metano en al menos un 30 % para 2030, en comparación con los niveles de 2020. Controlar de manera confiable las emisiones de metano a nivel mundial es fundamental para orientar los esfuerzos de mitigación, garantizar la transparencia y la responsabilidad, y evaluar el progreso hacia los objetivos establecidos.

Hasta hace poco, la mayor parte de nuestro conocimiento sobre las emisiones globales provenía de estudios científicos realizados en áreas geográficas limitadas o de inventarios ascendentes, es decir, la contabilización de actividades emisoras de metano y factores de emisión genéricos. Aunque son

inmensamente útiles, no pueden dar cuenta de la variabilidad de las emisiones de metano ni de la diversidad de infraestructuras emisoras de metano en distintas partes del mundo, lo que limita los esfuerzos de mitigación.

## El rol de los satélites en un sistema de observación mundial

Cada vez son más los instrumentos de detección de metano en órbita alrededor de la Tierra, lo que aporta una visión más amplia y global de las emisiones de metano y proporciona la cobertura espacial y temporal precisa que falta en nuestro conocimiento. Por ejemplo, las observaciones de TROPOMI, un instrumento de detección de metano a bordo del satélite Sentinel-5P de la Unión Europea (UE), han permitido realizar estudios detallados de emisiones regionales en todo el mundo, desde la [escala continental](#) hasta la [escala urbana](#). Los generadores de imágenes de fuentes puntuales, como GHGSat, EMIT, Sentinel-2, PRISMA, EnMAP y Gaofen 5, han transformado nuestra comprensión de las emisiones de metano, revelando la prevalencia de grandes emisiones debido a condiciones de operación “anormales” en [operaciones de petróleo y gas](#), así como la persistencia de tales emisiones de otros sectores, como el [carbón](#) y los [residuos](#). Estos instrumentos detectan cada vez más lugares con emisiones grandes y persistentes que pueden ser objetivos rentables para la mitigación. De manera impresionante, estas observaciones se han utilizado incluso para impulsar la mitigación rápida de emisiones considerables previamente inadvertidas, pero fáciles de corregir, en la [industria del gas](#) y del petróleo.

Al combinar sus fortalezas, estos satélites están mejorando nuestra capacidad para abordar las emisiones de metano. Las observaciones satelitales de flujos de emisiones en áreas grandes están revelando deficiencias y lagunas en el conocimiento de los inventarios de emisiones actuales, y están orientando los esfuerzos para mejorar nuestra comprensión de áreas específicas con emisiones altas. Al comparar las emisiones regionales, estas observaciones

también están contribuyendo a medir el impacto de las distintas prácticas de producción de combustibles fósiles y regulaciones sobre las emisiones de metano, y pueden servir de base para el desarrollo de regulaciones y acuerdos comerciales. Las observaciones satelitales a nivel de las instalaciones pueden ayudar a identificar eventos de emisiones grandes e impulsar una mitigación rápida. También pueden atribuir las emisiones a distintos operadores y, de este modo, destacar cómo las distintas prácticas de operación pueden afectar a las emisiones. Si se dispone de suficientes observaciones, estas se pueden utilizar para comprobar la validez de las emisiones notificadas por las instalaciones, lo que aumenta la transparencia y contribuye al cumplimiento de las regulaciones.

### **Diseño de una estrategia eficaz de observación del metano**

Ninguna tecnología puede capturar eficazmente todas las emisiones de metano. La elección de la tecnología depende del contexto específico. Con frecuencia, se necesita un sistema de observación de varios niveles, una combinación de diferentes métodos de medición, para obtener una comprensión integral de las emisiones e impulsar acciones eficaces. Los satélites, por su alcance mundial y su relativa rentabilidad, son idóneos para servir de base a este tipo de sistema de observación.

A continuación, se exponen algunos aspectos que deben considerarse al diseñar dicho sistema.

**Propósito del control del metano:** ningún sistema de observación puede capturar todos los aspectos de las emisiones de metano, por lo que los diseñadores deben centrarse en recopilar los datos adecuados para la aplicación prevista. Si el objetivo es proporcionar observaciones independientes de generales a específicas para validar y perfeccionar las emisiones informadas, se requiere cobertura satelital frecuente en regiones más grandes. Para detectar grandes emisiones anormales de unos pocos lugares para respaldar la contabilidad del metano, podría bastar con un control a escala de las instalaciones. Sin embargo, si el propósito es respaldar la mitigación de las emisiones, las observaciones satelitales deben realizarse con herramientas locales de control que puedan localizar la fuente exacta de las emisiones dentro de una instalación.

**Características de la fuente de metano:** un sistema de observación debe adaptarse a las fuentes que pretende controlar. Por ejemplo, si se espera que las emisiones sean intermitentes, el sistema debe prever observaciones regulares para capturar eventos poco frecuentes. Por otro lado, si se esperan emisiones relativamente constantes, las observaciones menos frecuentes podrían ser suficientes.

**Condiciones ambientales:** como demuestra este informe, los factores ambientales, como la nubosidad y los vientos fuertes, afectan la eficacia de la detección satelital de metano. La magnitud de estos impactos varía según la ubicación y la época del año. Todas las técnicas de medición se verán afectadas (de diferentes maneras) por las condiciones ambientales, por lo que el sistema de observación debe adaptarse a estas limitaciones locales.

**Disponibilidad y costo de las técnicas de medición:** cada sistema de observación debe optimizarse para ofrecer el máximo beneficio posible teniendo en cuenta la limitación de los recursos disponibles. La disponibilidad y el costo de las distintas tecnologías de observación varían mucho de una región a otra. Además, los recursos financieros y la capacidad de las partes interesadas varían considerablemente en todo el mundo. El diseño de cada sistema de observación debe tener esto en cuenta.

## Para localizar y cuantificar las emisiones se pueden combinar los distintos sensores satelitales

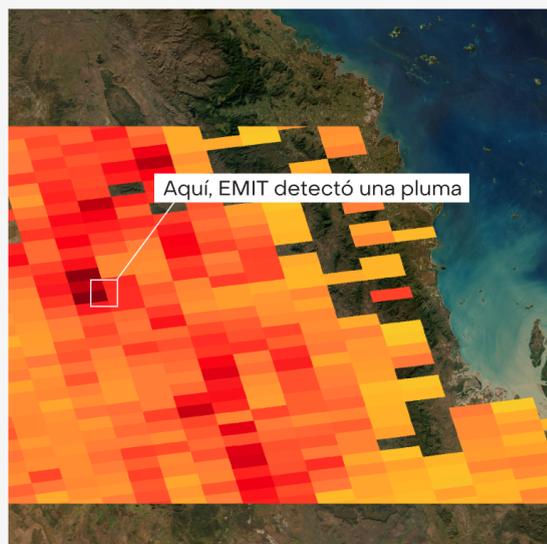
Observaciones de metano de los instrumentos TROPOMI y EMIT sobre la región de una mina de carbón en Nueva Gales del Sur, Australia

Concentraciones de metano de TROPOMI  
en partes por mil millones (ppb)  
19 Julio 2024

Mejoras de metano EMIT  
en partes por millón (ppm-m)  
17 Julio 2024

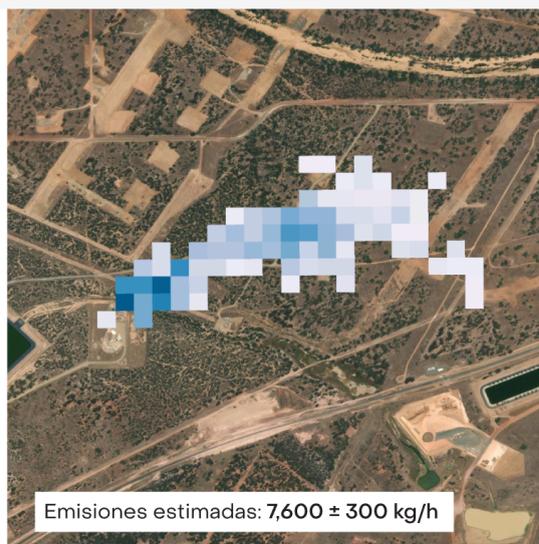
1,830 ppb

1,892 ppb



896 ppm-m

9,041 ppm-m



Fuente: Los datos de TROPOMI son del Sentinel-5p. Las concentraciones de metano EMIT y la estimación de emisiones de fuentes puntuales proceden de Carbon Mapper

**EMBER**

## Limitaciones ambientales en el control satelital del metano

Este informe tiene como objetivo mostrar que, a pesar del gran valor que ofrecen, los satélites resultarán menos efectivos para el control del metano en algunas áreas, ya que las condiciones ambientales no les permitirán llegar a todas las partes del mundo con la constancia y frecuencia necesarias para informar de manera completa los esfuerzos globales de mitigación. Por ejemplo:

- la nubosidad persistente la cobertura de datos satelitales en las regiones tropicales;

- durante los meses de invierno, debido a que el sol permanece bajo en el horizonte, las zonas de latitudes altas permanecerán relativamente poco iluminadas, lo que impedirá que los sensores cuenten con la luz necesaria para observar el metano de manera eficaz, incrementando aún más su elevado límite de detección;
- los vientos fuertes y las superficies oscuras, como los bosques, pueden hacer que incluso los eventos de grandes emisiones sean difíciles de observar;
- el terreno accidentado en las regiones montañosas dificultará o imposibilitará la interpretación de algunas mediciones satelitales, lo que creará un obstáculo anual para obtener observaciones de metano confiables en estas áreas.

Por supuesto, la diversidad de instrumentos espaciales significa que estos factores afectarán sus capacidades de manera diferente, y, en cierta medida, un sistema de observación que combine varios sensores espaciales incrementará la observabilidad de las emisiones de metano en muchas partes del mundo. Aun así, la combinación de los retos ambientales puede provocar que algunas áreas tengan una cobertura de datos reducida en determinadas regiones.

En este informe trazamos un mapa de los efectos regionales de los diversos parámetros ambientales que afectan la detección de metano desde el espacio. Para ello, examinamos el efecto combinado de cinco parámetros: nubosidad, elevación del sol, reflectividad del suelo, terreno irregular y velocidad del viento. Este informe muestra dónde se espera que uno o más de estos parámetros dificulte algunas observaciones satelitales durante partes significativas del año. En muchos casos, estos lugares pueden observarse, pero los datos en dichos lugares tendrán menos disponibilidad, solo estarán disponibles a partir de un subconjunto de satélites para observar metano o solo estarán disponibles con poca frecuencia. Con el mapeo de estos efectos, nuestro objetivo es ayudar a los gobiernos, al mundo académico y otras partes interesadas a establecer expectativas realistas sobre la disponibilidad de información satelital en su región y, en última instancia, planificar sistemas integrados de observación del metano.



## 2. Condiciones ambientales desafiantes

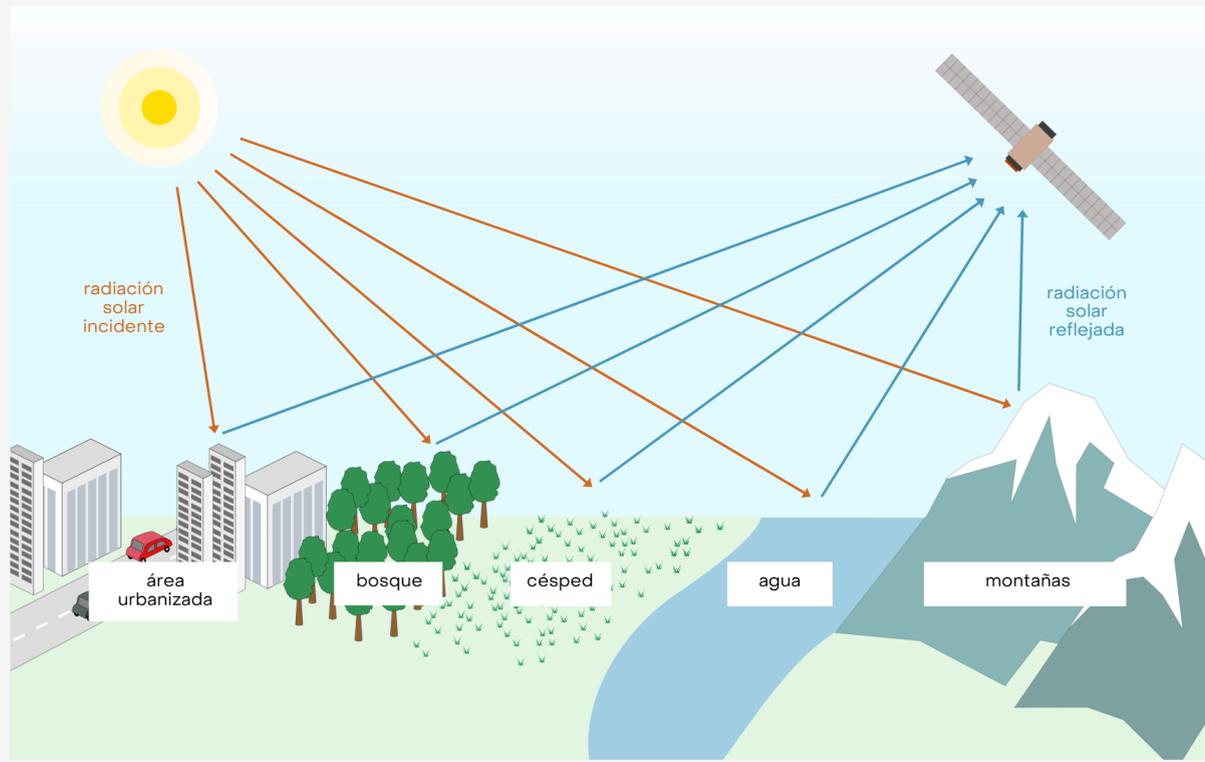
# Las condiciones ambientales pueden interferir con las mediciones satelitales del metano

---

**Los factores ambientales locales, como la nubosidad hasta el terreno accidentado, pueden limitar la capacidad de los satélites para detectar metano, lo que destaca la necesidad de mediciones alternativas en determinadas áreas.**

Aunque el metano es invisible al ojo humano, absorbe radiación infrarroja y se puede observar con cámaras especializadas. Actualmente, estos instrumentos se instalan en satélites, donde observan la luz solar que atraviesa la atmósfera, se refleja en la superficie terrestre y viaja nuevamente hacia el espacio, como se ilustra en la siguiente figura. Están sintonizados para buscar en esta luz patrones de absorción específicos que sirvan como huella dactilar del metano en la atmósfera. Luego, se utilizan algoritmos especializados para considerar muchos otros factores que podrían influir en la cantidad de radiación que llega al satélite e inferir la cantidad de metano presente en el trayecto de la luz.

## Los instrumentos de los satélites observan la luz solar reflejada en la superficie de la Tierra y buscan la huella digital de la absorción de metano



Fuente: Ember

**EMBER**

Diversos factores ambientales pueden impedir que la luz solar llegue al sensor del satélite, lo que puede dificultar o imposibilitar a veces la detección de metano; otros factores, como los vientos fuertes, pueden dispersar y diluir el metano en la atmósfera, lo que dificulta la detección del metano, por ejemplo, y genera mayores límites de detección.

### **Los impactos de las condiciones ambientales son específicos de cada satélite**

No todos los satélites se ven afectados por igual por las diversas condiciones ambientales. La forma exacta en la que estas condiciones afectarán a la

capacidad de los satélites para medir y cuantificar las emisiones de metano variará en función de las características específicas de cada instrumento. Por ejemplo, los instrumentos construidos para detectar cambios en la concentración del metano sobre grandes áreas se verán muy afectados incluso por unas pocas nubes sobre el área que están estudiando; al mismo tiempo, un satélite de alta resolución, que trata de detectar las emisiones desde una instalación en la misma área, puede ser capaz de ver entre las nubes rotas y observar la instalación.

Los investigadores han estado estudiando durante mucho tiempo las formas en que las condiciones de observación afectarán a los diferentes instrumentos satelitales de detección de metano. Por ejemplo, investigaciones recientes han [destacado](#) el gran impacto que tendrá el tamaño de los píxeles de un sensor en su capacidad para observar el metano en los trópicos. Otros investigadores han [estudiado](#) detalladamente los factores que limitan la habilidad de un instrumento específico (TROPOMI) para observar el metano alrededor del mundo.

Este informe resume dichos estudios y destaca los patrones más amplios que afectan a las observaciones satelitales de metano de una forma u otra al cartografiar las regiones donde los satélites se ven más o menos afectados por estos problemas ambientales, sin enfocarse en las características de instrumentos específicos.

Por consiguiente, identificamos las condiciones de observación utilizando categorías genéricas como “favorable”, “moderada” y “difícil”. En condiciones “favorables”, cielos despejados y superficies brillantes relativamente planas, se espera que los satélites funcionen de la mejor manera. Cuando las zonas están marcadas como de condiciones “moderadas”, las fuentes de metano pueden estar frecuentemente cubiertas por nubes y la complejidad del terreno puede impedir que los satélites detecten algunas plumas que, de otro modo, verían fácilmente. En condiciones “difíciles”, detectar el metano podría ser imposible para algunos sensores o producirse en condiciones poco frecuentes o en plumas muy grandes.

**El impacto exacto de estas condiciones ambientales en los satélites específicos debe ser estudiado por separado para cada caso de uso y ubicación.**

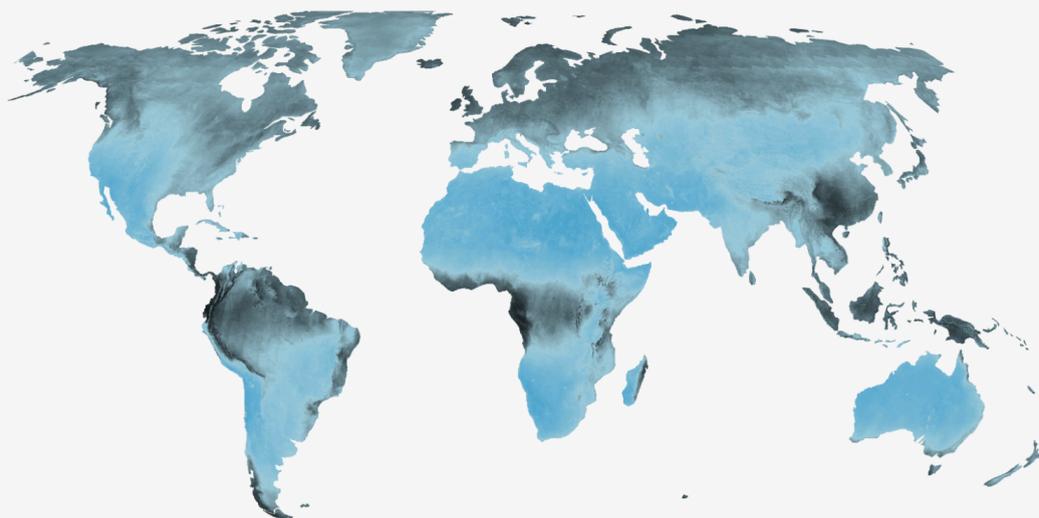
## Condiciones ambientales y sus impactos

Este informe considera los siguientes factores ambientales y sus impactos en la capacidad de los satélites para detectar el metano de forma eficaz.

### Nubosidad

#### Las nubes esconden el metano a la vista del satélite

Los satélites que detectan el metano no pueden ver a través de las nubes. En regiones tropicales con una nubosidad persistente se hace difícil la detección del metano a lo largo del año



Fuente: Promedio anual Cloud Score+ de Google Earth Engine.

**EMBER**

Los satélites de metano no pueden ver a través de las nubes y esto hace que la nubosidad sea el [obstáculo más importante](#) para detectar metano desde el

espacio. Debido a que son mucho más brillantes que la superficie terrestre, incluso si una pequeña nube tapa de forma parcial un pixel de satélite, esta interferirá con las mediciones e impedirá que el satélite detecte metano. En algunas regiones con nubosidad persistente, como los trópicos, esto puede dificultar las observaciones satelitales de metano durante todo el año.

Las características satelitales, como la resolución espacial, tendrán una gran influencia en cómo las nubes impactan en su capacidad para controlar el metano. Por ejemplo, un satélite de alta resolución, construido para controlar el metano en instalaciones individuales, puede que sea capaz de detectar entre nubes rotas, aunque este tipo de observaciones siguen presentando desafíos. Por otro lado, un satélite construido para cuantificar el metano en regiones más amplias, si se encuentra con la misma nubosidad, podría no encontrar nunca una vista completamente libre de nubes necesaria para sus mediciones.

## Rugosidad del terreno

### Las montañas dificultan la interpretación de las observaciones satelitales

El terreno accidentado hace que la interpretación de la señal recibida por los satélites sea más complicada



Fuente: Basado en el modelo digital de elevación GMTED2010.

**EMBER**

Algunos satélites tienen dificultades para estimar el metano en regiones con [terreno montañoso](#). Las irregularidades del terreno en esas regiones crearán sombras en parte de la escena observada, lo que dificultará la interpretación de la cantidad de luz que llega al satélite. Como la luz se refleja en distintas partes del terreno irregular, llegará al satélite habiendo atravesado distintas partes de la atmósfera, lo que complicaría aún más la interpretación de las señales de los

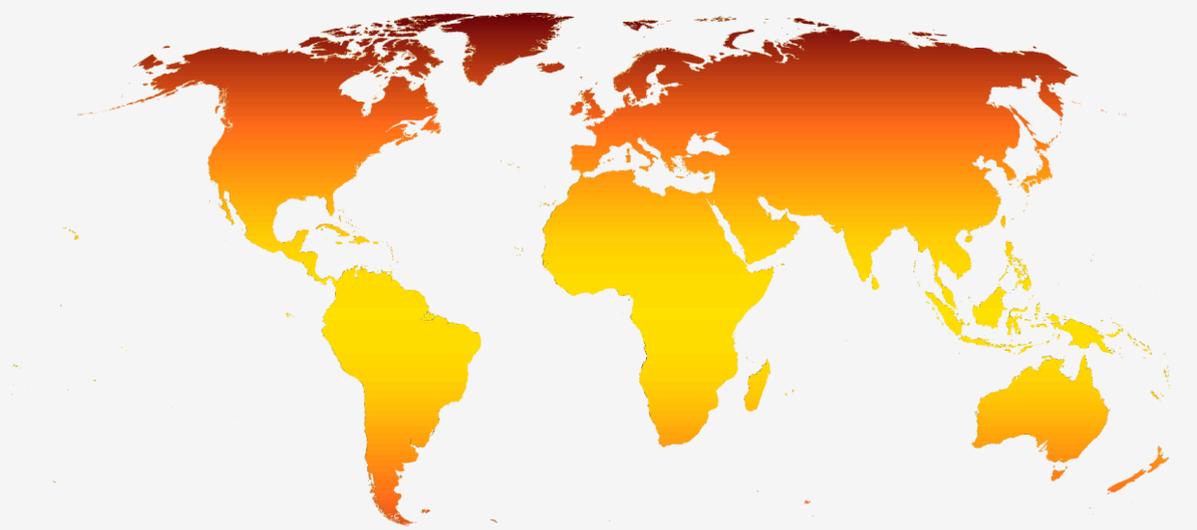
satélites. En combinación, estos factores harán que el terreno accidentado sea un obstáculo anual para la detección de metano. Como muestra el mapa, esto puede afectar a grandes partes del mundo como Asia central, el oeste de Sudamérica, el medio oeste de América del Norte y el oeste de Balkans.

Como sucede con las nubes, la forma en la que este parámetro afecta a los diferentes sensores satelitales dependerá de gran parte de las características de su sensor. Un sensor de alta resolución podría ser capaz de cuantificar el metano en una pequeña zona plana alrededor de una instalación de interés mientras que, por el contrario, a un satélite de control del área le resultaría imposible estimar las emisiones de metano en una región montañosa más amplia.

## Elevación solar

### La baja elevación solar dificulta la detección del metano en altas latitudes

Durante varios meses, en las latitudes del norte, el sol no saldrá por encima del horizonte. Durante estos meses, la superficie del suelo estará poco iluminada, en comparación con los meses de verano cuando el sol está más arriba en el cielo. Cuando menos luz incide en la superficie, menos luz se refleja en el sensor.



Fuente: Promedio anual de elevación solar.

**EMBER**

La mayoría de los satélites de detección de metano que se utilizan para estudiar las concentraciones de metano cerca de la superficie requieren de una luz solar brillante para funcionar eficazmente. Sin embargo, no siempre se dispone de suficiente luz. Por ejemplo, durante el invierno en latitudes altas el sol no se eleva por encima del horizonte, dejando grandes partes de la Tierra con poca iluminación durante varios meses en esa época. Como resultado, la cobertura

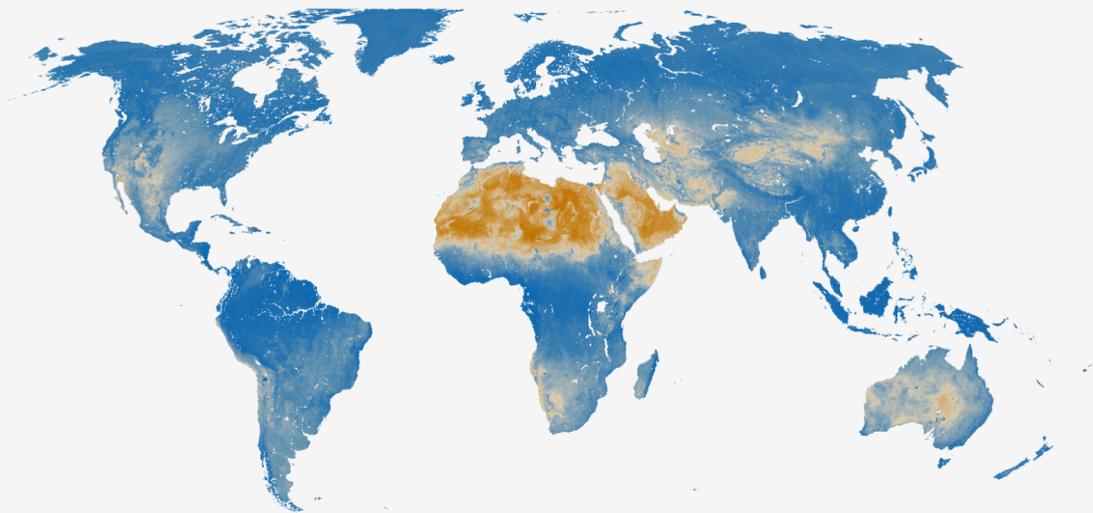
de datos puede reducirse considerablemente durante el invierno con [algunos sensores](#). Partes de Rusia, Canadá y Argentina se ven realmente afectadas por este parámetro.

El impacto exacto de las condiciones de luz baja en cada instrumento detector de metano dependerá de su diseño. Los instrumentos optimizados para funcionar en condiciones de poca luz pueden verse menos afectados, pero en cualquier caso sufrirán un impacto negativo. La órbita satelital, que define la hora local en la cual un satélite orbitará sobre una ubicación, también afectará el impacto de este parámetro en el instrumento específico.

## Brillo de la superficie

### Las superficies más oscuras hacen que el metano sea más difícil de divisar

Es un desafío detectar metano en superficies oscuras, como bosques, suelo descubierto y húmedo y agua, ya que no reflejan la suficiente luz solar hacia el satélite. La nieve también aparece oscura en las longitudes de onda infrarrojas de onda corta que suelen utilizarse para detectar metano.



Fuente: Reflectancia media anual de la superficie, obtenida a partir de los datos modificados de Sentinel-2, procesados con Google Earth Engine.

**EMBER**

Las superficies oscuras del suelo, como los bosques, no reflejarán la luz suficiente hacia el sensor del satélite, lo que posiblemente resulte en [un mayor nivel de incertidumbre](#). Al igual que con la baja elevación del sol, esto podría dificultar la detección de la absorción de metano. Las áreas cubiertas de nieve también aparecen mayoritariamente oscuras en las longitudes de onda infrarrojas de onda corta utilizadas para detectar metano. Este efecto se puede ver fácilmente

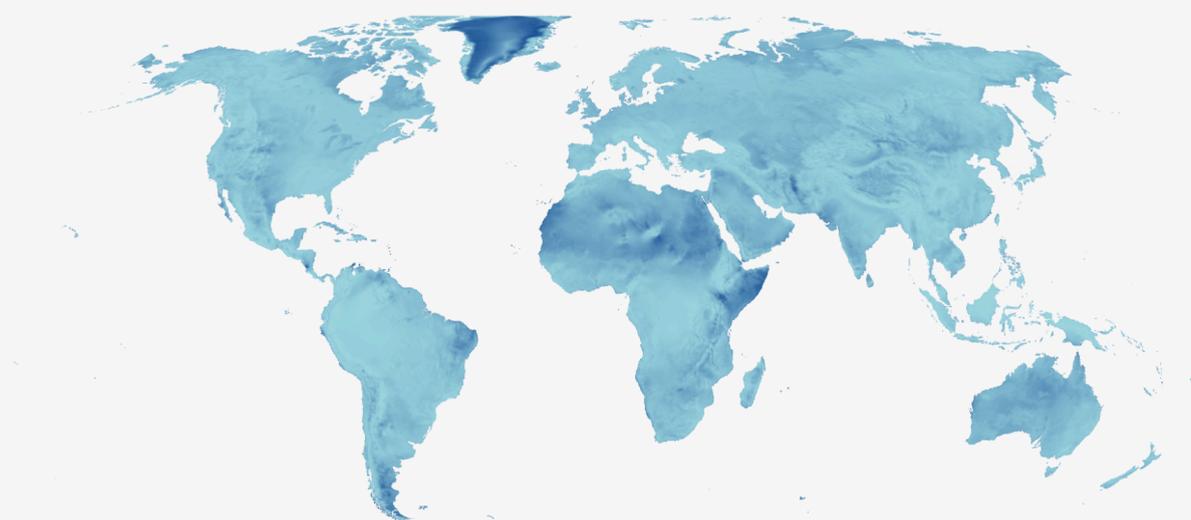
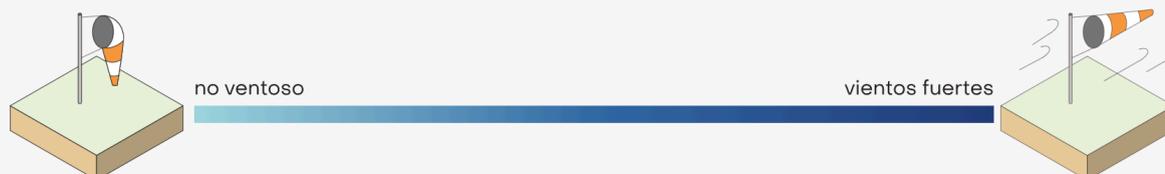
en los bosques tropicales y en las regiones cubiertas por nieve en latitudes altas. Por otro lado, las regiones áridas reflejarán luz abundante y serán favorables para la detección de metano.

En nuestro estudio, se excluyen las superficies de aguas continentales y oceánicas porque, en la mayoría de los casos, son demasiado oscuras para ser utilizadas en la detección de metano. Tenga en cuenta que se están desarrollando nuevas técnicas para ajustar el ángulo de visión del sensor para mejorar la luz solar reflejada en el agua (destello solar). Esta técnica puede ofrecer un conocimiento significativo por ejemplo para [la producción de petróleo y gas en el mar](#), pero no forma parte de este informe. Para algunos instrumentos, si una superficie es muy brillante también es un desafío porque la gran cantidad de luz puede cegar al sensor; como esto es poco frecuente, el efecto no se tendrá en cuenta en nuestro estudio.

## Velocidad del viento

### El viento dispersa las plumas de metano, esto hace que sean más difíciles de detectar

Una vez que el metano se emite a la atmósfera, los vientos lo arrastran lejos de la fuente y forman una pluma de metano. Las altas velocidades del viento pueden hacer que una pluma se diluya más rápidamente en un área más amplia, reduciendo la concentración de metano en cada lugar, lo que dificulta su detección.



Fuente: Basado en los datos de ERA5-Land.

**EMBER**

Los vientos fuertes pueden dispersar rápidamente el metano lejos de su fuente, lo que reduce la concentración local y, por lo tanto, es más difícil para el satélite distinguir la pluma de la concentración de metano de fondo. Si bien se requiere una cierta cantidad de viento para la formación de plumas y, por consiguiente, su cuantificación, en general, las velocidades más elevadas de los vientos se relacionan con [mayores límites de detección](#).

En regiones con vientos fuertes persistentes, como el sur de Argentina, los satélites solo serán capaces de detectar grandes plumas en comparación con regiones con condiciones de viento más suaves.

Las condiciones del viento tendrán un mayor impacto en los satélites de imagen de plumas de alta resolución, ya que las plumas de metano se dispersarán rápidamente por los fuertes vientos. Los satélites de baja resolución, cuyo objetivo es cartografiar el metano en regiones más amplias, se verán menos afectados por las condiciones del viento.

## Nuestra metodología

Estos cinco factores ambientales, y su cambio a lo largo del año, han sido estudiados para explorar qué tan favorables son las ubicaciones para las observaciones de metano. Primero, el efecto de cada factor ambiental para cada mes se estudia de forma individual. En concreto, aplicamos límites a cada uno de los cinco factores para definir si las condiciones en ese momento y lugar en específico son “favorables”, “moderadas” o “difíciles” para las observaciones (vea el Apéndice para una descripción detallada de los límites y los conjuntos de datos de entrada utilizados). En segundo lugar, calculamos el impacto combinado de todos los parámetros para cada mes. Si alguna entrada cae en la categoría “difícil”, se clasificará al mes como difícil. De forma similar, si alguna entrada se clasifica como “moderada”, pero ninguna como “difícil”, el resultado final será “moderada”. Para obtener una puntuación “favorable”, todas las entradas deben estar en la categoría “favorable”. El resultado es la clasificación mensual para cada ubicación alrededor del mundo.

Como ya se ha señalado, las categorías asignadas solo deben utilizarse como indicadores aproximados de las áreas en las que las observaciones satelitales de metano podrían tener menor disponibilidad. Nuestro análisis es conservador porque identificamos zonas y momentos del año en los que se espera que, al

menos, algunos sensores satelitales sean menos capaces de controlar el metano, o no puedan hacerlo. Estas categorías no reflejan, por ejemplo, cómo las condiciones ambientales afectan de manera diferente a los instrumentos diseñados para el control de las emisiones a escala de las instalaciones frente a los destinados a medir las emisiones en zonas más extensas. En las áreas etiquetadas como “moderadas” o “difíciles” de controlar, los usuarios deben estar atentos, ya que algunos satélites que en otra oportunidad serían muy útiles para su caso de uso pueden no funcionar como se espera.

Luego, investigaremos el impacto de los factores ambientales en las infraestructuras de la extracción de carbón, petróleo y gas, responsables de una parte sustancial de las emisiones antropogénicas de metano.



### 3. Regiones difíciles de controlar

# La mayoría de las regiones pueden estar bien controladas por los satélites, pero aún quedan algunas regiones difíciles

---

**El setenta por ciento de los lugares de extracción de combustibles fósiles se encuentran en regiones favorables para las observaciones satelitales durante la mayor parte de los meses del año, mientras que el 30 % están en zonas clasificadas como “moderadas” o “difíciles” para la observación. El número de tales instalaciones varía significativamente entre países.**

Las condiciones ambientales que afectan al control satelital en todo el mundo distan mucho de ser homogéneas. Las áreas que clasificamos como difíciles, donde las condiciones son “moderadas” o “difíciles” durante al menos 6 meses al año, se encuentran especialmente en regiones tropicales. Principalmente, esto sucede debido a la persistente nubosidad y, en las latitudes altas, enfrentan el desafío añadido de la baja luminosidad durante el invierno. Las regiones montañosas con terrenos accidentados en el este de Asia, el oeste de América y Europa son también difíciles de observar, principalmente, por los satélites de mapeo de áreas.

In contrast, relatively arid regions in north Africa, central Asia, Australia, and the southern US appear to have near ideal observation conditions throughout the year. Not surprisingly, many of the initial satellite studies that inform our understanding of methane emissions are focused on these relatively arid regions.

En cambio, las regiones relativamente áridas en el norte de África, Asia central, Australia y el sur de EE. UU. tienen al parecer las condiciones de observación casi ideales a lo largo del año. No es de sorprender, muchos de los estudios satelitales iniciales que informan nuestra comprensión de las emisiones de metano se enfocan en estas regiones relativamente áridas.

De acuerdo a los datos de producción del [Global Coal Mine Tracker \(GCMT\)](#) de Global Energy Monitor (GEM), nuestro análisis muestra que el 30 % de la producción de carbón se realiza en regiones difíciles de observar. Para el petróleo y gas en tierra, los datos del [Global Oil and Gas Extraction Tracker](#) de GEM sugieren que el 29 % de la producción global está situada en regiones difíciles de controlar.

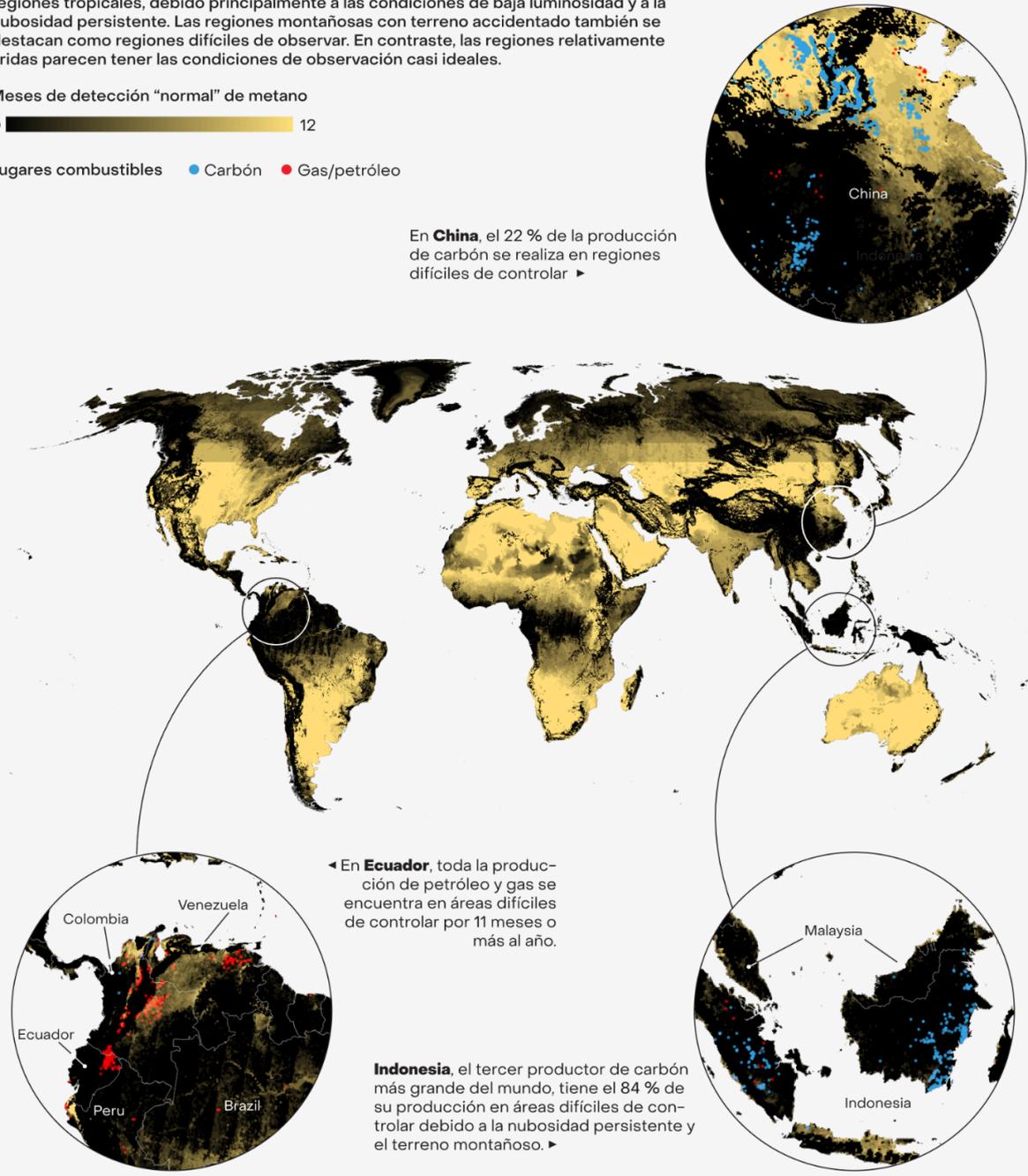
# El efecto combinado de factores ambientales impide que los satélites controlen de forma eficaz las emisiones de metano en algunas partes del mundo

Nuestro análisis revela una serie de regiones difíciles de observar en latitudes altas y en regiones tropicales, debido principalmente a las condiciones de baja luminosidad y a la nubosidad persistente. Las regiones montañosas con terreno accidentado también se destacan como regiones difíciles de observar. En contraste, las regiones relativamente áridas parecen tener las condiciones de observación casi ideales.

Meses de detección "normal" de metano



Lugares combustibles ● Carbón ● Gas/petróleo



Fuente: La ubicación de las minas de carbón procede de la publicación de abril de 2024 del Global Coal Mine Tracker de Global Energy Monitor. La ubicación de los sitios de petróleo y gas procede de la publicación de marzo de 2024 del Global Oil and Gas Extraction Tracker de Global Energy Monitor.



Se puede explorar [en línea](#) un mapa interactivo que muestra la categoría de detección de metano de cada activo de combustible fósil, ya que varía cada mes.

## Puntuación de dificultad de detección para la recuperación de metano por satélite

Categorías de detección de metano

■ Difícil ■ Moderado ■ Favorable



Fuente: El factor geográfico: cómo las condiciones ambientales determinan el control del metano desde el espacio. La ubicación de las minas de carbón proviene del Global Coal Mine Tracker, Global Energy Monitor, edición de abril de 2024. La ubicación de los sitios de petróleo y gas proviene del Global Oil and Gas Extraction Tracker, Global Energy Monitor, edición de marzo de 2024. Mapa base: Esri, Maxar, Earthstar Geographics y la Comunidad GIS.

**EMBER**

## Diferencias entre países en cuanto a la facilidad de control satelital de la producción de carbón

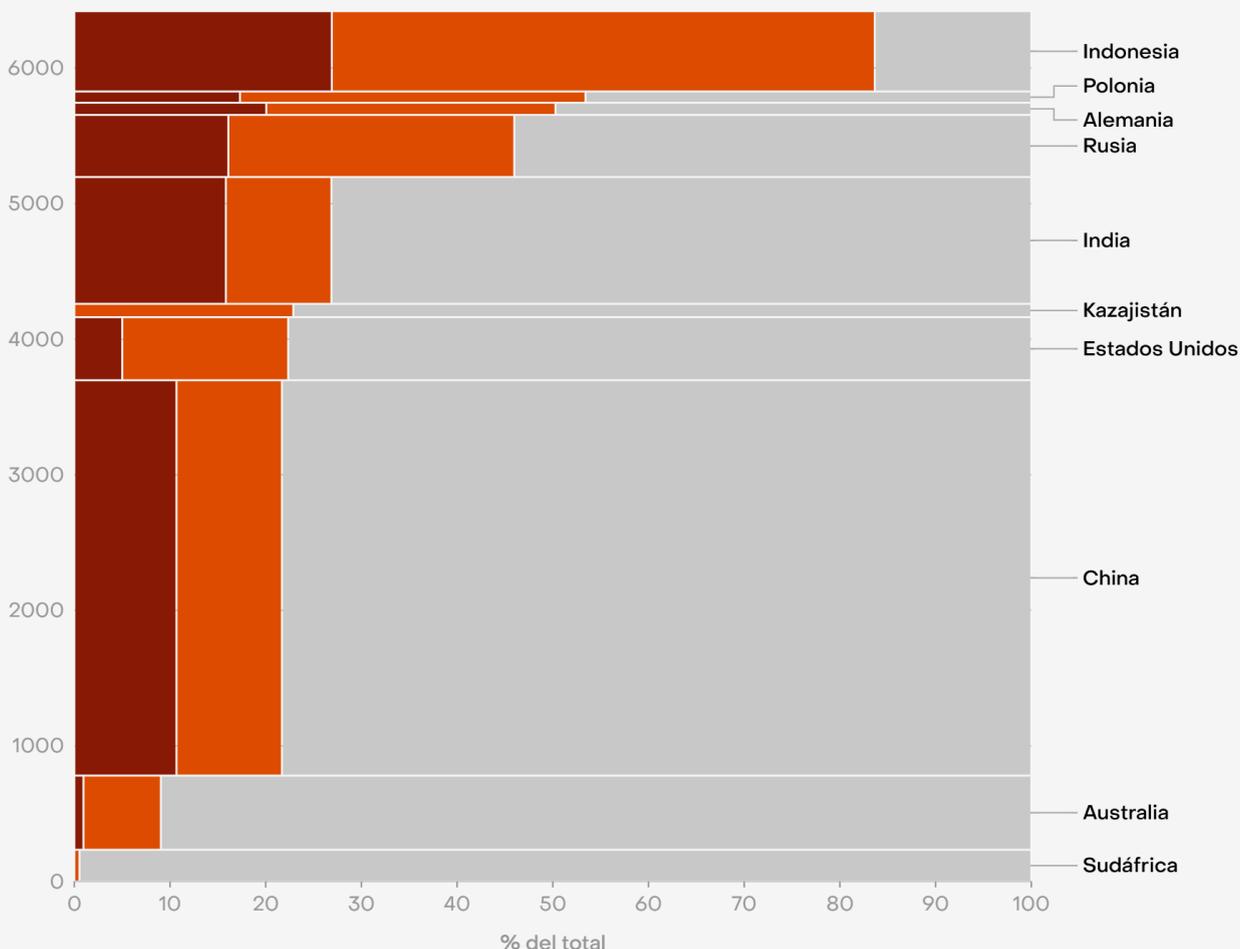
Un análisis de los 10 principales países productores de carbón revela que las condiciones para el control del metano por satélite son casi ideales en Sudáfrica, donde el 99 % de la producción se realiza en condiciones favorables, y en Australia, donde el 91 % de la producción de carbón tiene lugar en regiones favorables. En contraste, la mayoría de la producción de carbón en regiones con condiciones difíciles de controlar se concentra en partes de China, Indonesia, India, Rusia y Estados Unidos. Definimos como difícil de controlar el hecho de tener 6 meses o más con una categoría “difícil” o “moderada”.

### Los diez principales productores de carbón tienen algunas minas de carbón en lugares que dificultan el control de metano por satélite

Diez principales productores de carbón clasificados por el porcentaje de su producción situado en regiones donde se dificulta la detección de metano por satélite.

■ Difícil ■ Moderada ■ Favorable

Producción (Mt/y)



Fuente: Los datos de producción de carbón proceden del suplemento de septiembre de 2024 de Coal Mine Tracker de Global Energy Monitor.

## China

El 22 % de la producción de carbón de China, que asciende a 633 millones de toneladas anuales, se encuentra en regiones difíciles de controlar. Muchas de las minas están ubicadas en el sudoeste de China donde las condiciones para controlar el metano son difíciles por la nubosidad y el terreno accidentado, especialmente para los satélites que monitorean áreas.

## Indonesia

Notoriamente, Indonesia, el [tercer productor de carbón más grande](#) del mundo, tiene el 84 % de esta producción ubicada en regiones difíciles de controlar. Esto equivale a 496 millones de toneladas de producción de carbón al año que pueden quedar sin controlar. La mayoría de las minas de carbón están agrupadas en las islas de Sumatra y Kalimantan donde las condiciones son adversas debido a la nubosidad persistente y los terrenos montañosos.

## India

El 27 % de la producción de carbón en India, que representa 251 millones de toneladas anuales, se ubica en regiones difíciles de controlar durante algunos meses del año. Esto se debe a la nubosidad durante la temporada de monzones entre los meses de julio y agosto lo que puede impactar en el control satelital.

## Rusia

En Rusia, el 46 % de la producción de carbón, que asciende a 211 millones de toneladas anuales, está en regiones difíciles de controlar. La detección de metano por satélite puede ser un desafío debido a la baja elevación estacional del sol y a la nubosidad.

## Estados Unidos

En los Estados Unidos, el 22 % de la producción de carbón del país está en regiones difíciles de controlar, lo que equivale a 104 millones de toneladas por año. En la región minera del carbón de la cuenca interior occidental, las difíciles condiciones se deben al terreno accidentado de las cordilleras de las Montañas

Rocosas. En la cuenca de los Apalaches, las condiciones son difíciles debido a la mezcla de terrenos montañosos (montañas Apalaches), la cobertura intermitente de nubes y las superficies oscuras.

### **Otras regiones en las que las minas de carbón son difíciles de controlar**

Hay otro grupo de regiones con minas de carbón en ubicaciones difíciles. Uno de estos grupos se encuentra en el oeste de Balkans, específicamente en Bosnia y Herzegovina, Serbia y Macedonia del Norte. Estas minas están situadas en los Alpes Dináricos, donde el terreno montañoso podría dificultar el control satelital del metano a los cartógrafos de flujo de área.

## **Diferencias nacionales en la facilidad del control satelital de la producción de petróleo y gas**

Un análisis de los 10 principales países productores de petróleo y gas revela que las condiciones para el control del metano por satélite son casi ideales en Arabia Saudita, donde el 100 % de la producción se realiza en condiciones favorables, y en Argelia, donde el 99 % de la producción tiene lugar en regiones favorables.

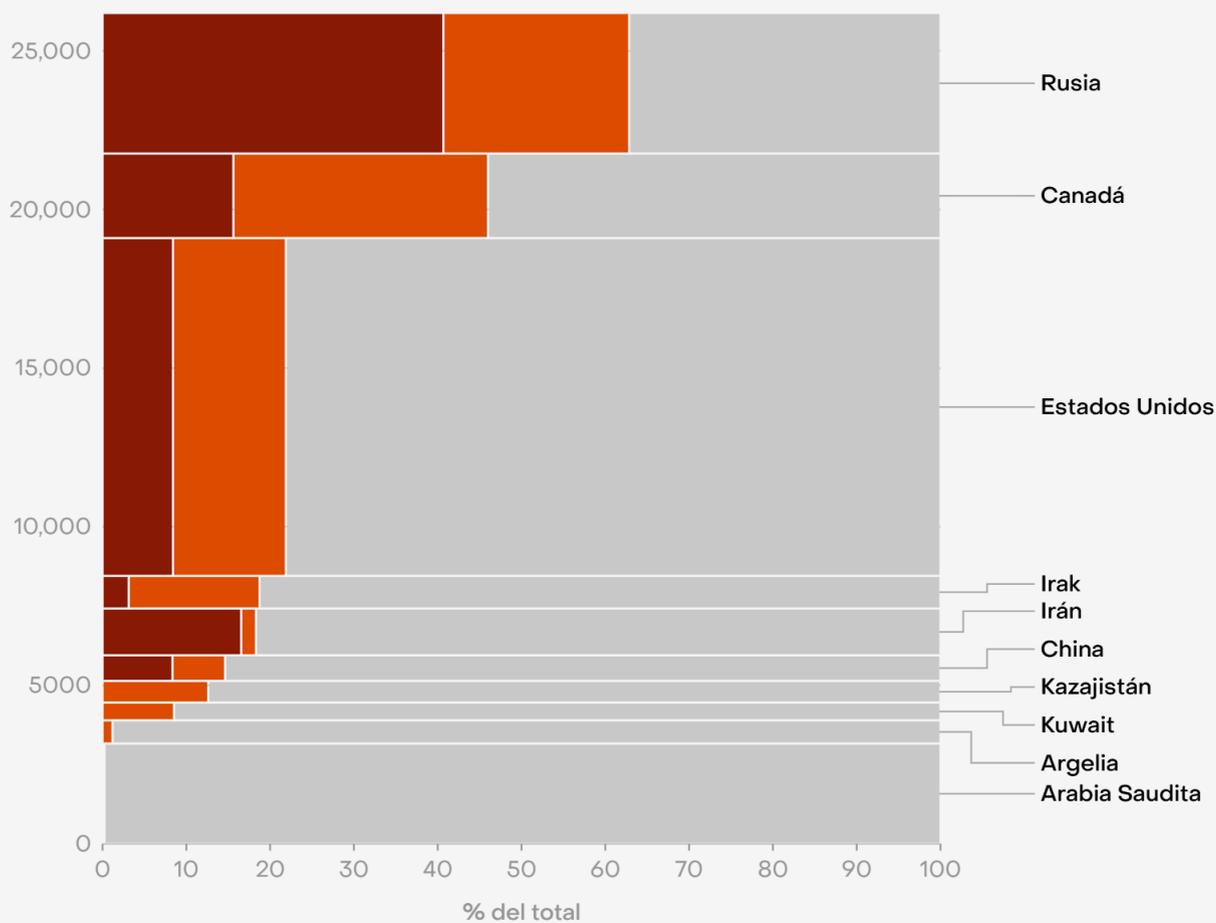
La mayor parte de la producción de petróleo y gas en regiones difíciles de controlar se concentra en zonas de Rusia, Canadá y Estados Unidos.

## Muchos de los lugares de extracción de petróleo y gas están en ubicaciones difíciles para el control satelital de metano

Diez principales productores de petróleo y gas clasificados por el porcentaje de su producción situados en regiones donde los satélites encuentran dificultades para detectar metano.

■ Difficult ■ Moderate ■ Favourable

Production (million boe/y)



Fuente: La producción de petróleo y gas proviene de la publicación de marzo de 2024 del Global Oil and Gas Extraction Tracker de Global Energy Monitor.

**EMBER**

## **Rusia**

En Rusia, el 62 % de la producción de petróleo y gas está en regiones difíciles de controlar. La mayoría de los lugares de petróleo y gas difíciles de controlar en Rusia están agrupados en la cuenca siberiana occidental, que es la mayor región productora de petróleo y gas de Rusia, con importantes reservas de hidrocarburos. Controlar estos lugares es un reto durante varios meses al año debido a la escasa elevación del sol en invierno, la frecuente nubosidad y la intermitencia de las superficies oscuras.

## **Estados Unidos**

En los Estados Unidos, el 22 % de la producción total se ubica en regiones difíciles de controlar. Estos sitios de extracción están distribuidos a lo largo de muchas áreas. El primer grupo se encuentra en Alaska y abarca North Slope y el Golfo de Alaska. Estos lugares están situados en latitudes superiores a 59,7° N y las condiciones para controlar se ven muy afectadas por la falta de luz solar. El segundo grupo es la cuenca de los Apalaches, donde es difícil controlar debido a la combinación de nubosidad intermitente y superficies oscuras, lo que interfiere con la observación satelital. Además, hay grupos más pequeños como la cuenca Ventura y el norte de Los Ángeles. En esta área, el terreno accidentado de las cordilleras Transversales pueden ser un desafío para los satélites con baja resolución espacial.

## **Canadá**

En Canadá, el 46 % del petróleo y gas se produce en regiones difíciles de controlar. Se encuentran a lo largo del flanco oriental de las Montañas Rocosas, donde el terreno accidentado dificulta el control, principalmente, para los sensores de satélite de baja resolución. Al este de las montañas Rocosas, en la cuenca Alberta, las condiciones son difíciles debido a la mezcla de una baja elevación solar, nubosidad y períodos esporádicos cuando la superficie es oscura.

## **Irán e Irak**

Tanto Irán como Irak tienen el 19 % de la producción de petróleo y gas en regiones que pueden ser difíciles de controlar. En Irán estos lugares de producción están ubicados dentro del cinturón plegado de Zagros, el área más grande para la producción de petróleo y gas. El terreno accidentado de las montañas Zagros posee desafíos significativos para el control satelital debido a su compleja topografía, donde otros factores son favorables para la observación del metano. Como resultado, los sensores satelitales con alta resolución espacial pueden controlar efectivamente estos lugares de petróleo y gas, mientras que será más difícil controlar las emisiones de metano con los satélites con baja resolución.

En partes de Irak, la producción es difícil de controlar entre junio y agosto debido a los vientos Shamal, un viento estacional fuerte del noroeste

### **Otras regiones productoras de petróleo y gas que son difíciles de controlar**

Varios países de América Latina tienen gran parte de su producción de petróleo y gas en regiones difíciles de controlar. Por ejemplo, el 70 % de la producción de Colombia puede ser difícil de controlar con satélites. Esta producción se da en la cuenca de Putumayo-Oriente-Marañón, a lo largo de la frontera con Ecuador, donde la nubosidad persistente dificulta los esfuerzos de control, y en las cuencas alta, media y baja del valle de Magdalena, donde el control se complica por la cordillera de los Andes circundante. En Ecuador, casi toda la producción de petróleo y gas (98 %) está en regiones difíciles de controlar. Los sitios de extracción en Ecuador están agrupados en la cuenca occidental, parte de la región del Amazonas, ubicada directamente en el ecuador. Al igual que en Colombia, debido al clima de selva tropical, la detección por satélite puede verse obstaculizada por una nubosidad persistente durante todo el año.

## **Estudios de casos prácticos**

Los factores que dificultan la detección de metano varían en función de la ubicación de la instalación. Hemos seleccionado estos casos prácticos para

destacar cómo las distintas combinaciones de factores ambientales influyen en la capacidad de un satélite para controlar las emisiones de metano de instalaciones de todo el mundo.

## Proyecto Minas de carbón de Tabang, Indonesia

El Proyecto Minas de carbón de Tabang, ubicado en Kalimantan Este, es una colección de minas de carbón dispersas en un área de 30 km<sup>2</sup>. En la mina se extrae carbón subbituminoso. Es la séptima mina de carbón que más metano emite en Indonesia, según [Global Energy Monitor](#). La detección de metano es persistentemente difícil durante todo el año (11 meses moderados y 1 difícil) debido a múltiples factores.

### Condiciones de observación difíciles en la mina de carbón del proyecto Tabang, Indonesia

El terreno accidentado, la superficie oscura y la persistente nubosidad de la mina de carbón de Tabang, Indonesia, dificultan las observaciones satelitales de metano durante todo el año.



#### Factores ambientales

Número de meses en los que el control del metano es difícil y moderado



El lugar está nublado durante 9 meses al año. La mina está ubicada en una región montañosa, lo que dificultará las observaciones, especialmente para los satélites con baja resolución espacial, que se ven más afectados por la rugosidad del terreno. En los pocos casos en los que los satélites logran observar el suelo con cielos despejados, la superficie se percibe oscura en las longitudes de onda infrarrojas de onda corta utilizadas por el satélite, por lo que es posible que solo se detecten las plumas intensas.

### **Mina de carbón Shanxi Qincheng, China**

La mina de carbón subterránea Shanxi Qincheng, ubicada en la principal región productora de carbón de China, la provincia de Shanxi, extrae carbón antracita principalmente para la generación de electricidad. Con una profundidad de 446 m, la mina produce grandes cantidades de metano debido a su estructura profunda. La detección del metano puede ser desafiante durante todo el año (12 meses en categoría moderada), principalmente debido a la rugosidad del terreno en los montes Taihang, lo que podría limitar la utilidad de los satélites de mapeo de áreas. Se observa nubosidad intermitente y la superficie es oscura durante agosto y septiembre.

## Condiciones de observación difíciles en la mina de carbón Shanxi Qincheng, China

En la mina de carbón de Shanxi Qincheng, China, el terreno accidentado, junto con los períodos de superficies oscuras y nubosidad, podrían dificultar las observaciones satelitales de metano durante todo el año



### Factores ambientales

Número de meses en los que el control del metano es difícil y moderado



Nubosidad

3/12



Velocidad del viento

0/12



Rugosidad del terreno

12/12



Elevación solar

0/12



Brillo de la superficie

2/12



Efecto combinado

12/12



Fuente: Mapa base: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, y la comunidad de usuarios de GIS

**EMBER**

## Campo Indio Oeste, yacimiento de gas en Argentina

Campo Indio Oeste es un yacimiento de gas ubicado en la provincia sureña de Santa Cruz, Argentina, y sus condiciones de observación son características de América del Sur. La detección del metano puede resultar desafiante durante la mitad del año (6 meses en categoría moderada). El lugar es ventoso, con vientos promedio que superan los 4 metros por segundo mensualmente entre

octubre y enero, lo que dispersa las plumas de metano y dificulta su detección. El control del metano también se ve dificultado durante los meses de invierno (junio y julio), cuando la elevación del sol es baja.

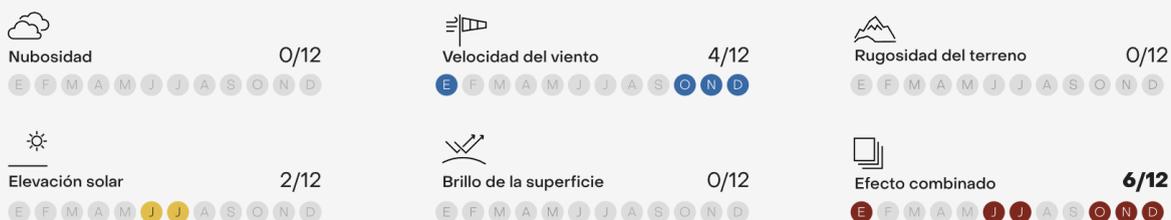
## Condiciones de observación difíciles en el yacimiento de gas Campo Indio Oeste, Argentina

La baja elevación del sol en invierno y la elevada velocidad del viento en verano podrían dificultar las observaciones de metano por satélite durante la mitad del año.



### Factores ambientales

Número de meses en los que el control del metano es difícil y moderado



Fuente: Mapa base: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, y la comunidad de usuarios de GIS



## Arenas petrolíferas de Athabasca, Canadá

Las Arenas petrolíferas de Athabasca, en Alberta, Canadá, son grandes yacimientos de betún y una de las principales fuentes de petróleo no

convencional del mundo. La detección del metano puede resultar desafiante en la región durante la mitad del año (2 meses en categoría difícil y 4 meses en categoría moderada). En invierno (de noviembre a febrero), la elevación del sol es baja, lo que significa que llega muy poca luz a la superficie y, en consecuencia, a los sensores satelitales. La superficie es oscura durante el invierno (de noviembre a enero) debido a la capa de nieve, que absorbe la radiación de onda corta. Esta absorción provoca que se refleje menos luz hacia el sensor. Junio también es un mes nublado, lo que podría afectar el control satelital del metano.

## Condiciones de observación difíciles en las arenas petrolíferas de Athabasca, Canadá

La baja elevación del sol y el bajo brillo de la superficie en invierno dificultan las observaciones satelitales del metano durante la mitad del año.



### Factores ambientales

Número de meses en los que el control del metano es difícil y moderado



Nubosidad

1/12



Velocidad del viento

0/12



Rugosidad del terreno

0/12



Elevación solar

4/12



Brillo de la superficie

4/12



Efecto combinado

6/12



Fuente: Mapa base: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, y la comunidad de usuarios de GIS

**EMBER**



## 4. El camino a seguir

# Diseño de estrategias de observación que tengan en cuenta las condiciones locales

---

**Es necesario considerar una combinación de tecnologías al desarrollar una estrategia para el control de las emisiones de metano. Las mediciones cercanas al suelo, con sensores en aviones, drones, vehículos terrestres o ubicaciones fijas, podrían ser necesarias para identificar las fuentes de emisión y fortalecer las acciones de mitigación.**

Se necesitan sistemas de observación robustos para alcanzar los objetivos de mitigación del metano. Los instrumentos espaciales constituirán la columna vertebral de estos sistemas mundiales de control del metano, gracias a su capacidad para detectar grandes emisiones individuales y evaluar las emisiones regionales en amplias regiones del planeta.

Los nuevos satélites, como MethaneSAT y Tanager-1, amplían el conjunto actual de instrumentos de control y ofrecen una resolución espacial alta, lo que proporciona mayores oportunidades para medir las emisiones de metano, incluso en regiones nubladas. Además, programar las observaciones de los satélites durante épocas del año en las que las condiciones ambientales sean favorables mejoraría la cobertura de los datos, dentro de la medida en que sea posible. Sin embargo, algunas regiones serán más difíciles de controlar que

otras debido a las condiciones ambientales, y depender únicamente de los satélites puede no ser suficiente para determinados propósitos en algunas regiones.

Para controlar las emisiones de metano de manera más eficaz, se requiere un sistema de observación de varios niveles. Se trata de un sistema que utiliza diferentes tipos de mediciones para comprender las emisiones, según las condiciones ambientales específicas y las necesidades del usuario. Esto es análogo a un sistema de observación meteorológica, en el que las observaciones satelitales se combinan con radares, mediciones de estaciones terrestres y globos meteorológicos para generar los datos necesarios para los modelos de predicción meteorológica y el control a largo plazo de las tendencias climáticas. Por ejemplo, el control continuo realizado por las estaciones terrestres puede medir la temperatura del aire en el Ártico, donde las observaciones satelitales son limitadas. Por otro lado, los satélites pueden inferir la temperatura del aire sobre el océano, donde no hay estaciones terrestres.

Es probable que un diseño universal para un sistema de observación de varios niveles no se adapte a todos los escenarios debido a la diversidad de los entornos, la variabilidad de las fuentes de metano y las limitaciones tecnológicas. Los usuarios locales deberán adaptar las tecnologías de medición a sus condiciones, necesidades y recursos específicos. En lugares donde las condiciones de observación favorables son poco probables, como en Ecuador o Indonesia, los satélites tendrán menos probabilidades de controlar eficazmente los grandes eventos de emisión o informar sobre la validación de los inventarios de emisiones de metano. En estos casos, será necesario desarrollar sistemas robustos para realizar estas tareas. Lograr que dichos sistemas sean viables con los recursos disponibles, incluso en países en vías de desarrollo, es una tarea crucial para investigadores, legisladores y donantes.

## Tecnologías alternativas para la medición del metano

Se están utilizando varias tecnologías alternativas para complementar los sensores satelitales de metano. Estas tecnologías cuentan con sensores instalados en aviones, drones, vehículos terrestres o ubicaciones fijas. Utilizados de manera individual o conjunta, estos sistemas ofrecen una vista detallada de las emisiones de metano, supliendo la escala espacial o temporal que les falta a los sistemas por satélite. Al estar cerca de la fuente de las emisiones, estos sistemas pueden detectar emisiones mucho más pequeñas con frecuencia y ayudar a identificar la fuente específica, lo que facilita la orientación de las acciones de mitigación. Hay un ritmo acelerado de investigación e inversión para transformar estas tecnologías individuales en sistemas de control robustos y lograr que sean más accesibles.

Ninguna tecnología, por sí sola, será la solución definitiva para medir eficazmente el metano en todas las escalas espaciales y temporales necesarias para respaldar la mitigación. Cada tecnología ofrece únicamente una visión parcial del mundo invisible del metano, y será necesario combinar estas tecnologías e integrarlas en un sistema de observación de varios niveles. Además, todos los sensores también pueden verse afectados por factores ambientales como el viento, la nubosidad y la disponibilidad de luz. Por ejemplo, algunos sensores terrestres pasivos que dependen de la luz ambiental se ven afectados de manera similar por las condiciones de poca luz al igual que los sensores satelitales. En cambio, los sensores activos, que generan su propia fuente de luz, siguen sin verse afectados por las condiciones de luz natural (al igual que algunos sistemas que no utilizan absorción de luz para detectar metano). Se requiere más investigación para evaluar cómo los diversos enfoques de medición alternativa responden a los desafíos ambientales. Para desarrollar una estrategia eficaz de control de metano, es esencial comprender las limitaciones de la tecnología satelital y alternativa.

Como ha mostrado este informe, la combinación exacta de tecnologías que integrarán este sistema debe ser específica geográficamente, teniendo en cuenta las características de las emisiones y las condiciones ambientales

locales. En algunas regiones, los datos satelitales por sí solos pueden ser suficientes para el control regular de grandes eventos de emisión y estimaciones descendentes de emisiones. Sin embargo, en otras áreas, será necesario recurrir a tecnologías adicionales, posiblemente combinadas con observaciones satelitales.

## Más allá de las tecnologías específicas

La construcción de sistemas eficaces de observación de varios niveles implica mucho más que solo hacer uso de sensores: requiere esfuerzos coordinados y apoyo. Con el apoyo externo adecuado, las partes interesadas locales deben desarrollar la capacidad para crear, evaluar y adaptar las tecnologías de medición en sus contextos específicos, y necesitan los recursos para lograrlo.

Los profesionales de diferentes regiones que se enfrentan a desafíos similares deberían conectarse para intercambiar mejores prácticas y lecciones aprendidas, lo que favorecerá la difusión de las innovaciones lideradas por los usuarios. Además, se deben desarrollar rápidamente esfuerzos internacionales para crear protocolos e instalaciones de prueba, con el fin de fomentar la coherencia y la confianza en los datos generados.

Para cumplir con sus objetivos climáticos, el mundo debe [reducir las emisiones de metano relacionadas con los combustibles fósiles en un 75 % para 2030](#). Los satélites desempeñarán un rol fundamental en este esfuerzo, controlando el progreso de los pasos de mitigación bien comprendidos, así como destacando nuevas oportunidades para la acción. Con poco tiempo, el conocimiento debe compartirse de manera libre y eficaz para que todas las partes interesadas puedan maximizar su impacto en esta lucha colectiva.

# Metodología

Esta es una descripción técnica del método y los datos utilizados para definir la categorización de detección.

Se combinan cinco conjuntos de datos en cuadrícula para crear una puntuación con tres categorías: favorable, moderada y difícil para la detección de metano. El sistema de puntuación está diseñado de manera flexible para ejecutarse en cualquier resolución espacial o intervalo temporal. Para los fines de este estudio, cada conjunto de datos se interpola en una cuadrícula espacial y temporal coherente ( $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , lo que equivale aproximadamente a una resolución de 10 km en el ecuador, y un intervalo temporal mensual). Se eligió la cuadrícula espacial para que fuera la misma que la cuadrícula de [ERA5-land](#).

Para cada conjunto de datos de entrada, las condiciones en cada celda de la cuadrícula se etiquetan como favorables, moderadas o difíciles, según los límites definidos en la tabla a continuación.

Se asigna una categoría combinada para cada celda de la cuadrícula/mes de la siguiente manera:

- Favorable: todos los datos deben clasificarse en categorías favorables.
- Moderada: uno o más datos deben clasificarse en una categoría moderada.
- Difícil: uno o más datos deben clasificarse en una categoría difícil.

El resultado es una categoría de detección para cada mes, para cada píxel de 0.1 grados a nivel global.

### Conjuntos de datos de entrada y umbrales utilizados para calcular las categorías de dificultad

| Dato de entrada           | Fuente de datos | Favourable               | Moderado                             | Difícil                   |
|---------------------------|-----------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Variabilidad de elevación | GMTED2010       | $\sigma_z < 80$ m        | $80 \leq \sigma_z \leq 100$          | $\sigma_z > 100$ m        |
| Ángulo cenital solar      | Modelled        | $\theta < 70^\circ$      | $70^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ | $\theta > 75^\circ$       |
| Cobertura nubosa          | Cloud Score+    | $c > 0.3$                | $0.2 \leq c \leq 0.3$                | $c < 0.2$                 |
| Albedo                    | Sentinel-2      | $\alpha > 0.06$          | $0.02 \leq \alpha \leq 0.06$         | $\alpha < 0.02$           |
| Velocidad del viento      | ERA5 land       | $w < 4$ ms <sup>-1</sup> | $4 \leq w \leq 10$                   | $w > 10$ ms <sup>-1</sup> |

**EMBER**

### Variabilidad de elevación

Las regiones montañosas se identifican utilizando la variabilidad en la elevación del modelo de elevación digital [GMTED2010](#). La desviación estándar de la elevación dentro de una celda de cuadrícula de 0.1 grados proviene de datos de 30 arcosegundos. Las desviaciones estándar que sean superiores a 100 m se clasifican como difíciles. Se clasifican como moderados los valores entre 80 m y 100 m, y como favorables los inferiores a 80 m. Estos límites son los mismos que se utilizan para aplicar las banderas de calidad en el [algoritmo de detección TROPOMI](#).

### Ángulo cenital solar

El ángulo cenital solar se modela utilizando el día del año y la latitud. Los valores mensuales se calculan como la media de los valores máximos diarios. Los ángulos cenitales solares mayores a 75° se clasifican como difíciles, entre 70° y 75° como moderados, y menos de 70° como favorables. Estos límites se toman de las banderas de calidad aplicadas al [algoritmo de detección TROPOMI](#).

## Nubosidad

Identificamos las áreas con nubosidad alta para la detección de metano utilizando el producto [Cloud Score+](#), disponible en Google Earth Engine. El producto se ha generado utilizando imágenes de Sentinel-2 y aprendizaje automático para identificar la similitud entre imágenes de cielo nublado y despejado, y contiene dos puntuaciones de nubosidad. Aquí, se utiliza la cs band (banda cs), donde un valor de 0 representa cielos “nublados” y un valor de 1, cielos “despejados”. Se obtuvieron los datos mensuales promedio de Cloud Score+ para los años 2020 a 2023. Se calcula un promedio mensual de estos años para tener en cuenta la variabilidad interanual de la nubosidad.

Los desarrolladores de CloudScore+ proporcionan un límite recomendado de 0.65 para distinguir entre días despejados y nublados; sin embargo, este límite solo es válido para los datos diarios sin procesar de 10 m. Se necesita un nuevo límite cuando los datos se agregan a la resolución espacial de 0.1 grados y un intervalo temporal mensual. La sección de ajuste de parámetros que se presenta a continuación describe cómo se seleccionó empíricamente el límite favorable. Se estimó que el límite ajustado de nubosidad para las condiciones “favorables” era mayor que 0.3. El límite “difícil” se definió en  $\leq 0.2$ . Cuando se determinó este límite, se utilizó el criterio para garantizar que los países tuvieran una distribución de la producción de petróleo, gas y carbón en las categorías “moderada” y “difícil”.

## Albedo

El albedo de la superficie en el infrarrojo de onda corta, donde se realiza la detección de metano, se calculó a partir de [Sentinel-2](#) utilizando la banda 12, centrada alrededor de los 2190 nm. Los datos se ocultan para eliminar las aguas continentales y oceánicas utilizando el [mapa de clasificación de tierras de MODIS](#). El albedo se ocultó con nubes mediante el producto Cloud Score+ descrito anteriormente. Los valores promedio mensuales de albedo se calculan utilizando Google Earth Engine y se agregan de una resolución de 10 m a una de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ . Se generan datos mensuales para los años 2020 a 2023. Se calcula un

promedio mensual para representar la variabilidad interanual del albedo y reducir el impacto de la nubosidad en la cobertura de datos. La sección de ajuste de parámetros que se presenta a continuación describe cómo se seleccionó el límite de detección favorable. Se estimó empíricamente que el límite ajustado de albedo para las condiciones “favorables” era mayor que 0.06. El límite “difícil” se definió con valores de albedo de  $\leq 0.02$ . Este valor se seleccionó porque está relacionado con los datos de baja calidad en el algoritmo de detección TROPOMI.

## Velocidad del viento

Utilizamos las velocidades del viento zonal ( $u$ ) y meridional ( $v$ ) promedio mensual de 10 metros para los años 2020 a 2023 del conjunto de datos ERA5-Land, disponible en [Copernicus Climate Data Store](#). La velocidad del viento se calcula a partir de los componentes y se calcula la climatología mensual. Las velocidades del viento inferiores a 4 m/s se clasifican como favorables, entre 4 y 10 m/s se etiquetan como moderadas, y superiores a 10 m/s como difíciles. La sección de ajuste de parámetros que se presenta a continuación describe cómo se seleccionó el límite “favorable”. Para la velocidad del viento, la categoría “difícil” se definió como superior a un límite de 10 m/s. Este límite se informó en líneas generales en [publicaciones](#) que indican que la probabilidad de detección es menor con velocidades más elevadas de los vientos. Estos [estudios](#) mostraron una menor probabilidad de detección hasta 8 m/s, por lo que optamos por 10 m/s para ser precavidos. Se trata de un enfoque semicuantitativo, ya que el límite puede variar según las tasas de emisiones, y no hay una definición clara de las categorías “moderada” y “difícil”.

## Ajuste de límites

Para establecer límites favorables para la nubosidad, la velocidad del viento y el albedo, realizamos un ajuste de parámetros utilizando 2,962 observaciones de pluma de metano de TOPOMI, detectadas por Kayrros y el Sistema de Alerta y Respuesta al Metano del Observatorio Internacional de Emisiones de Metano (IMEO). Exploramos un rango de posible valores límites: velocidad del viento

(1 a 14 m/s), nubosidad (0.25 a 0.6) y albedo (0.025 a 0.3) y generamos 500 combinaciones diferentes utilizando [muestreo de hipercubo latino](#). Para cada combinación, chequeamos con qué frecuencia se obtenían las observaciones del TROPOMI en ubicaciones y meses favorables. Definimos como mejor grupo al que encontró observaciones en condiciones favorables en alrededor del 85 % de los casos.

Tenga en cuenta que solo se ajustaron las categorías “moderada”, ya que se puede definir si una observación existe o no. El límite que separa las categorías “moderada” y “difícil” no se ajustó de esta manera porque no está claro cómo hacerlo con precisión. En cambio, establecimos dichos límites según nuestro criterio de cada parámetro, como se describe anteriormente.

## **Limitaciones del método y trabajo a futuro**

No existen límites universales que se apliquen a todos los satélites, y algunos sensores pueden ser mejores que otros para detectar metano en determinadas condiciones ambientales. Por ejemplo, los sensores con alta resolución espacial (por ejemplo, GHGSat, EMIT o CarbonMapper) pueden detectar metano en algunas regiones montañosas donde un cartógrafo de flujo de área (TROPOMI) tendría dificultades. Además, para la mayoría de los parámetros no existen límites físicos claros en los que el sensor deje de detectar metano, sino una degradación gradual de su rendimiento previsto. El ajuste de límites se realizó solo en un conjunto de datos limitado, basado en lo detectado por un sensor y solo se incluyeron detecciones positivas. Por lo tanto, todos los límites proporcionados deben tratarse como guías aproximadas y no como límites físicos estrictos para el rendimiento de los satélites.

Otra limitación es que las categorías de detección se basan en datos mensuales, mientras que las observaciones satelitales representan un único sobrevuelo instantáneo. Esta simplificación se debe a los aspectos prácticos de la gestión de grandes conjuntos de datos. Sin embargo, usar datos mensuales puede ocultar la variabilidad presente en las observaciones diarias.

En este estudio no se incluyen todos los factores que afectan a la detección del metano. Por ejemplo, una carga elevada de aerosoles podría ser de particular importancia en regiones áridas y semiáridas, pero no se ha tenido en cuenta. La variabilidad del albedo terrestre también afectará la detección del metano, especialmente en el caso de los sensores multiespectrales, lo que dificulta la distinción entre las plumas de metano y los objetos del suelo; esto tampoco ha sido considerado en este estudio.

## Ubicación de los activos de combustibles fósiles

Las ubicaciones de los sitios de extracción de combustibles fósiles provienen de las publicaciones de Global Energy Monitor (GEM) tituladas [Global Coal Mine Tracker \(GCMT\)](#) y [Global Oil and Gas Extraction Tracker \(GOGET\)](#). Se calculan mensualmente las categorías “difícil”, “moderada” y “favorable” para las latitudes y longitudes más cercanas a 3,778 minas de carbón operativas y 4,703 activos operativos de extracción de petróleo y gas. Solo se incluyen lugares de exploración de petróleo y gas en tierra.

## Datos sobre la producción de combustibles fósiles

Los datos de producción de carbón proceden del [suplemento de septiembre de 2024](#) de Coal Mine Tracker de Global Energy Monitor, publicado recientemente. Este suplemento proporciona cifras de producción histórica para minas de carbón operativas a nivel mundial con capacidades superiores a 1 millón de toneladas por año, que abarcan los años 2017 a 2023. Para el análisis, se utilizan los valores de producción del año más reciente disponible para cada mina de carbón.

Los datos de la producción de petróleo y gas proceden de [Global Oil and Gas Extraction Tracker \(GOGET\)](#). Los datos incluyen los lugares de extracción que tienen una producción de 1 millón de barriles de petróleo por año o más o reservas de 25 millones de barriles de petróleo. Para estimar la producción combinada de petróleo y gas, la producción de gas se convierte en barriles

equivalentes de petróleo al año. Al igual que en el caso del carbón, en el análisis se utilizan los datos de producción del año más reciente disponible.

La producción en las categorías "difícil", "moderada" y "favorable" se calcula multiplicando la producción de GEM por la proporción del año clasificada con cada categoría. Es importante señalar que el conjunto de datos de GEM no incluye información sobre la producción de todos los activos enumerados, por lo que faltan algunos datos. Sin embargo, hemos elegido este conjunto de datos porque es de libre acceso.



# Reconocimientos

---

## Colaboradores

Los autores agradecen a Reynaldo Dizon por crear las ilustraciones de este informe.

Además, los autores agradecen a los colegas que ofrecieron valiosos comentarios durante la conceptualización y preparación de este informe, entre ellos Dody Setiawan, Zitely Tzompa Sosa, David McCabe, Sabina Assan, Hannah Broadbent, Eleanor Whittle, Muyi Yang, Jonathan Banks y Steve Reyes.

Agradecemos a todos los revisores externos por sus comentarios, que ayudaron a mejorar el informe.

## Foto

Foto de portada extraída de: [Unsplash](https://unsplash.com)

© Ember, 2025

Publicado bajo la licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual (CC BY-SA 4.0). Se le anima a compartir y adaptar este informe, pero debe dar crédito a los autores y al título, y debe compartir cualquier material que cree bajo la misma licencia.