

Observación de la Tierra y cambio climático: ¿Qué sabemos y cómo respondemos?

Emilio Chuvieco
emilio.chuvieco@uah.es

Académico Correspondiente de la RAC

Universidad de Alcalá, Departamento de Geología,
Geografía y Medio Ambiente, Grupo de investigación en
Teledetección Ambiental

Palabras clave: cambio climático, teledetección, responsabilidad ambiental.





RESUMEN:

Se presentan en este artículo algunas reflexiones sobre el papel que juega la teledetección espacial en la observación del sistema terrestre, particularmente de aquellas variables ligadas directamente al cambio climático. Se resumen las bases físicas para detectar estas variables y los principales ámbitos en los que se emplean estas observaciones. Finalmente, se incluye un análisis sobre el impacto que ese mejor conocimiento del clima terrestre podría tener en nuestra actividad cotidiana, particularmente hacia la adopción de medidas más eficaces para la mitigación y adaptación a los escenarios climáticos previsibles.

ABSTRACT:

This paper aims to present a summary of the main contributions of satellite Earth observation to improve our knowledge of the planetary system, mainly on those variables that are closely linked to climate change monitoring. First, the physical basis for detecting those essential climate variables are introduced, to then point out the main findings we have obtained on those processes. Finally, some thoughts are introduced on the potential impact of this better knowledge provided by remote sensing techniques on our responsibility towards the environment, particularly on improving our commitment towards climate mitigation and adaptation measures.



INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los temas científicos actuales con mayor impacto social, ya que las medidas para su mitigación o adaptación afectan al conjunto de la población. Por esta razón, la investigación sobre este tema tiene gran repercusión en los medios, siendo además uno de los ámbitos más activos en las revistas científicas. Basta realizar una exploración en los motores de búsqueda de artículos científicos para hacerse idea de la gran actividad investigadora en torno al cambio climático: casi cuatro millones de referencias en total, de las cuales algo más de ochocientas mil en los últimos cuatro años (según Google Scholar, último acceso en Agosto de 2021).

Pese a que el consenso científico sobre la existencia y las causas del cambio climático es muy amplio (Cook et al., 2013; Cook et al., 2016), todavía sigue presente en la opinión pública la percepción de que se trata de un tema en el que los especialistas siguen sin ponerse de acuerdo. En una encuesta reciente del Instituto Elcano se indicaba que un 40% de los entrevistados consideraba que no había acuerdo científico sobre esta cuestión, aunque la mayor parte (97%) coincidían en que existía el problema y que era principalmente de origen humano (Lázaro Touza et al., 2019). Diversos autores indican que esta desinformación sobre las bases científicas del cambio climático es una de las principales rémoras a la hora de adoptar políticas de mitigación más ambiciosas (Cook et al., 2016; Lewandowsky et al., 2019). Por esta razón, resulta conveniente expandir todas aquellas actividades de transferencia, que faciliten a la opinión pública una visión atinada sobre las causas y posibles repercusiones de esta cuestión, sin duda el principal problema ambiental al que nos enfrentamos actualmente.

Entre estas actividades está la mejor comprensión de los medios de observación del cambio climático, que nos permiten entender mejor el alcance de las tendencias, detectar mejor las anomalías y refinar los modelos predictivos. Entre estas técnicas ocupa un papel clave la teledetección espacial (Chuvieco, 2020; Purkis & Klemas, 2011; Stammer & Cazenave, 2017), que facilita una observación global y repetitiva de distintas variables de gran interés en el estudio del sistema terrestre.

Este artículo presenta las principales aportaciones que esta técnica brinda al estudio del cambio climático, revisando las bases físicas de la teledetección global, para acabar mostrando algunos ejemplos concretos de bases de datos generadas a partir de sensores satelitales. En la segunda parte del trabajo incluimos alguna reflexión sobre las implicaciones éticas de esta observación de la Tierra, ya que en nuestra opinión el mejor conocimiento de los problemas ambientales también debería llevarnos a adoptar actitudes más comprometidas para la solución

de los mismos.

BASES FÍSICAS DE LA TELEDETECCIÓN GLOBAL

El estudio del cambio climático requiere información de un amplio conjunto de variables, asociadas de una u otra forma al sistema terrestre. Algunas de ellas se recolectan mediante análisis in situ, como sería el caso de la dendrocronología o la criocronología, mientras otras se basan en sensores instalados en tierra (estaciones meteorológicas o hidrológicas) o a bordo de aviones o satélites. En este último caso, para que puedan obtenerse datos a distancia (lo que denominamos, en términos genéricos, teledetección), se precisa que exista un flujo energético entre el sensor y el objeto observado. Las técnicas más habituales recogen la radiación electromagnética reflejada por la superficie terrestre, ya sea de la luz solar o de una radiación propia del sensor (aquí se habla de sensores activos, los más comunes son el Lidar y el Radar). También puede recogerse la energía térmica emitida por la tierra en longitudes de onda más largas que el espectro visible. La figura 1 recoge las principales bandas del espectro en donde se detectan las variables de interés climático. Estas variables suelen conocerse como Essential Climate Variables (ECV), así definidas por el programa global de observación del clima (Bojinski et al., 2014; GCOS, 2016).

En las bandas más cortas del espectro puede detectarse la evolución de la capa de ozono, a partir de la diferente absorción entre la radiación ultravioleta (0,2 a 0,4 μm) y las bandas del infrarrojo. En el azul se presenta el pico de absorción de la clorofila en torno a 0,45 μm , que resulta idóneo para determinar la productividad biológica del océano. En el visible e infrarrojo cercano (0,5 a 0,9 μm) podemos determinar la productividad vegetal terrestre, así como el espesor óptico de la atmósfera para determinar aerosoles y nubosidad. El infrarrojo cercano (en torno a 1 μm) suele emplearse también con sensores activos láser (Lidar), tanto para medir la estructura vertical de la vegetación, como para estimar variaciones de las masas de hielo polares por gravimetría. La diferencia entre la reflectividad del infrarrojo cercano y del rojo también es muy útil para medir el vigor vegetal y detectar estrés hídrico o incendios. En el infrarrojo medio (2,5 a 8 μm) pueden detectarse incendios y volcanes activos por diferencia de emisión térmica frente al fondo, además de encontrarse algunas bandas de absorción de vapor de agua y de CO₂. En el térmico (10 a 12 μm) pueden medirse la temperatura del océano y de la tierra, así como la evapotranspiración de plantas y cultivos. En las microondas (>0,1 cm) puede estimarse la extensión y profundidad del hielo marino, así como determinarse la altura del océano y del hielo continental a partir de altímetros Radar.

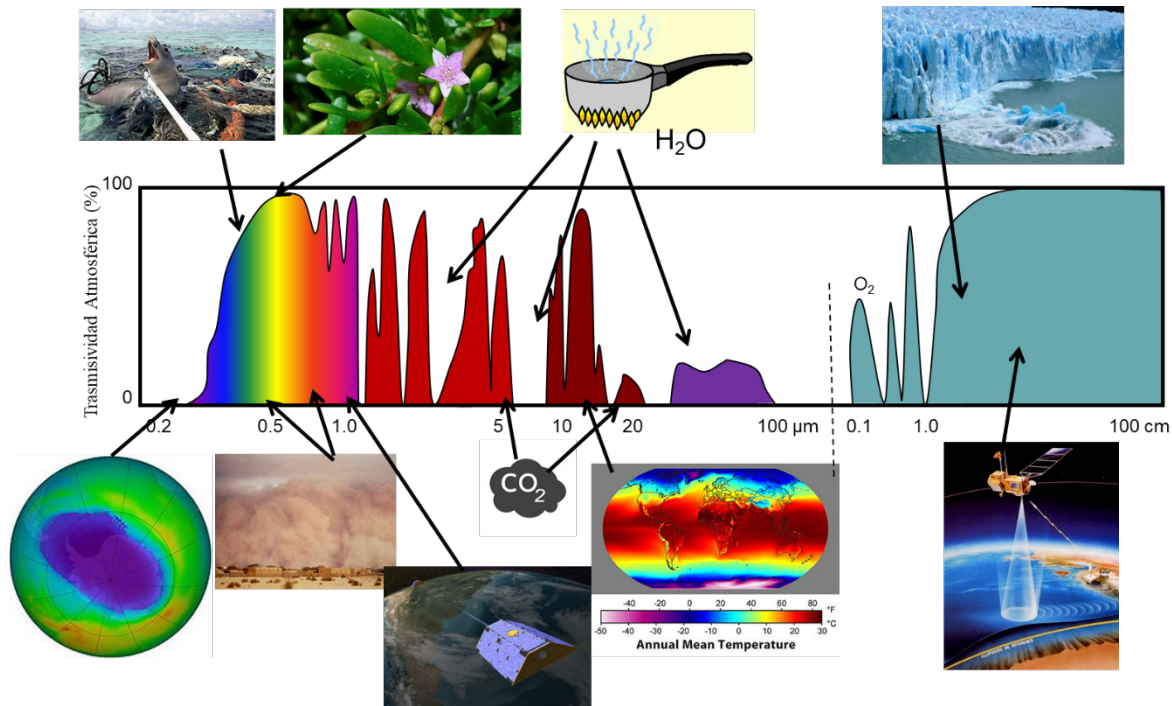


Fig. 1: Regiones del espectro donde se detectan las principales variables de interés climático.

PROGRAMAS ESPACIALES ORIENTADOS AL ESTUDIO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

La teledetección proporciona información global y a intervalos regulares, que varían entre pocas horas y pocos días, permitiendo observar fenómenos muy dinámicos, como tormentas tropicales, movimiento de corrientes marinas o inundaciones. Es un muestreo no destructivo de la variable de interés tomada con una resolución espacial bastante detallada (entre pocos metros y pocos kilómetros, según los objetivos de la misión), en condiciones comparables en el tiempo, desde una misma altura y con los mismos sensores, lo que facilita el análisis de tendencias, si bien la consistencia temporal requiere procesamientos más o menos sofisticados (Popp et al., 2020).

El principal problema de la teledetección espacial para generar ECV es su corta trayectoria, de apenas 40 años, que dificulta el establecimiento de series temporales suficientemente largas para observar cambios de ciclos en el clima (como es sabido, suelen cifrarse a partir de series de 30 años). Aunque hay algunas imágenes disponibles ya desde la década de los 70 del pasado siglo, los sensores mejor calibrados comenzaron en la primera década de este, con lo que tenemos información de más calidad sólo de los últimos 20 años (Lehmann et al., 2020). Esto dificulta la detección de anomalías a largo plazo, por lo que es preciso combinar esta técnica con otras basadas en la observación de campo o los sensores terrestres (Buchwitz et al., 2017).

Gracias a estas ventajas, las agencias espaciales han impulsado misiones específicas para observar los principales

procesos que afectan e impactan al clima del planeta. Seguramente uno de los más destacados ha sido el programa Earth Observing System, iniciado por NASA en 1999 con el lanzamiento del satélite Terra (<https://terra.nasa.gov/>, último acceso Agosto 2021), que incluía diversos sensores de observación global, como el MODIS, orientado a variables terrestres (<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>, último acceso Agosto 2021); el CERES, orientado al estudio del balance de radiación terrestre; el MISR, para estimaciones de algunos componentes verticales de la atmósfera; y el MOPITT, para estimaciones de monóxido de carbono. Además del Terra, se lanzó en 2002 en el marco del mismo programa el satélite Aqua (<https://aqua.nasa.gov/>, último acceso Agosto 2021), que incorporaba réplicas del MODIS y CERES, así como otros sensores orientados a variables atmosféricas y marinas. Además de estas misiones, NASA ha puesto en órbita otros satélites de gran interés para el estudio del cambio climático, como el Icesat-1 y 2 (orientados a la medición del hielo), Aura (variables atmosféricas), Cloudsat (nubes) y OCO (balance de carbono). Más recientemente, a fines de 2017 se inició la nueva familia de satélites meteorológicos de órbita polar de la serie NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), que incorporan sensores similares a los ya citados pero en una misión operativa que garantiza su continuidad futura. Esta serie se inició con la misión preparatoria NPP-Suomi, lanzada en 2013, y se ha formalizado con el lanzamiento del NOAA-20 a fines de 2017 (<https://www.nesdis.noaa.gov/JPSS-1>, último acceso Agosto 2021).

La Agencia Espacial Europea (ESA) ha hecho también un gran esfuerzo en la misma dirección, desarrollando misiones experimentales para complementar la información que



generaban otras agencias. Vale la pena destacar en este sentido el programa Climate Change Initiative (<https://climate.esa.int>, último acceso Agosto 2021), activo desde 2010, que ha permitido desarrollar series de datos globales y consistentes sobre distintas ECV. En la primera fase se abordaron 13 variables: aerosoles, nubes, gases de efecto invernadero, ozono, glaciares, hielo continental, cobertura del suelo, incendios, humedad del suelo, color del océano, hielo marino, nivel del mar y temperatura del océano (Hollmann et al., 2013), ampliándose con otras 10 en la segunda fase del programa, activa desde 2017. El programa CCI supone la principal aportación de la ESA al programa internacional Global Climate Observing System (GCOS), que define una lista de variables climáticas esenciales que deberían generarse a partir de teledetección (GCOS, 2016). En cuanto al segmento espacial, la ESA, en colaboración con la Unión Europea, ha puesto en órbita varios satélites de observación de la tierra en el marco del programa Copernico (<https://www.copernicus.eu/en>, último acceso Agosto 2021), asociados a determinados servicios de información geográfica (atmósfera, tierra, océano, seguridad, etc.). Uno de ellos está orientado específicamente al cambio climático (Copernicus Climate Change Service, C3S: <https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services/climate-change>, último acceso Agosto 2021). El programa Copernico incluye el desarrollo y lanzamiento de seis familias de satélites de observación de la tierra, denominados Sentinels. Hasta el momento se han lanzado 8 satélites en el marco de este programa, funcionando dos simultáneamente: Sentinel-1A y B (Radar de alta resolución), Sentinel-2A y B (óptico de alta resolución), Sentinel-3A y B (óptico y térmico de resolución media), Sentinel-4 (será lanzado en 2023), Sentinel-5P (se ha lanzado un precursor) (ambos 4 y 5 llevan sensores para espectroscopia de la atmósfera a baja resolución), y Sentinel-6A (altímetro radar).

Otras agencias espaciales también están realizando un importante esfuerzo para mejorar nuestro conocimiento del sistema terrestre. Mención especial merecen los sensores de la agencia japonesa JAXA para el seguimiento del CO₂ y el metano atmosférico (Gosat-1 y 2: <https://www.eorc.jaxa.jp/GOSAT/index.html>), y los de las agencias meteorológicas europea (Eumetsat), china, india y rusa.

ANÁLISIS DE TENDENCIAS CLIMÁTICAS A PARTIR DE DATOS DE TELEDETECCIÓN

A partir de la información que recolectan los distintos satélites de observación de la Tierra podemos generar series temporales que nos permiten analizar tendencias y anomalías de variables críticas para el clima terrestre. Algunas de las observaciones más interesantes pueden resumirse en estos datos:

- Los cinco años más calientes desde 1880 hasta la fecha han ocurrido en los últimos seis años (2015 a 2021). Con excepción de 1998, los 20 años más calientes del registro instrumental han ocurrido en lo que llevamos de siglo XXI. En el último informe del IPCC, recientemente publicado, se cifra en 1,1^o la tasa de calentamiento global sobre el periodo industrial (1850-1900). Las olas de calor están siendo cada vez más frecuentes, observándose valores excepcionales en los últimos años. El caso de Canadá y el NW de EE.UU. ha sido especialmente llamativo en el verano de 2021 con valores de temperatura media más de 15 grados superiores a la media de los últimos 7 años (figura 2):

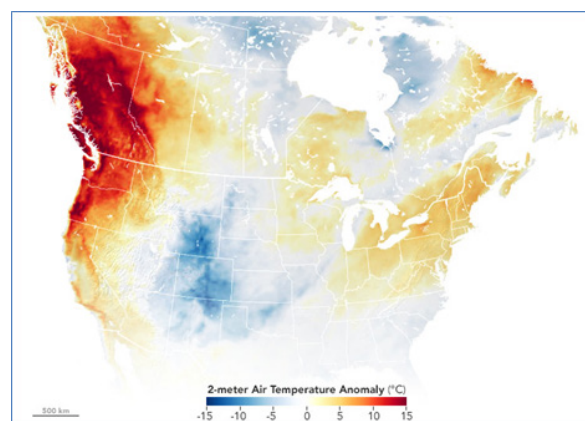


Fig. 2: Anomalía térmica a fines de junio de 2021 en Norteamérica. La imagen está producida por un modelo climático. <https://earthobservatory.nasa.gov/>

Lógicamente las estimaciones de tendencias temporales corrigen los efectos de isla térmica urbana. Además, se observan trayectorias similares en la temperatura del agua del mar, no afectada por este fenómeno. La tendencia al calentamiento es compatible con la existencia de eventos extremos, incluso olas de frío inusitadas, puesto que, al haber más energía en el sistema, tiende a rebasar sus límites previos (von Schuckmann et al., 2020).

- Se ha observado una pérdida de casi 4 millones de km² de hielo marino estival en el Ártico entre 1980 y 2020 (-11,3% por década), con menores pérdidas en hielo invernal (-2,7%/década). Estas observaciones se basan en datos de sensores de micro-ondas pasivas (fig. 3). Aunque en la Antártida el efecto es menos evidente, también se observan pérdidas muy relevantes en el sector occidental, el más masivo (Shepherd et al., 2020).

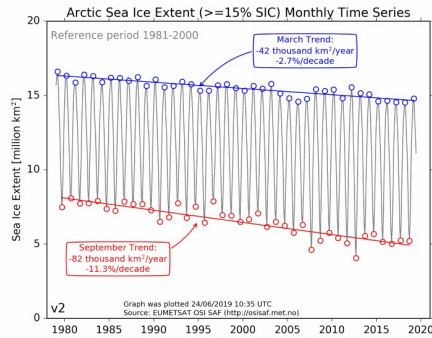


Fig. 3: Variación de la superficie de hielo marino ártico en los últimos 40 años <https://osi-saf.eumetsat.int/community/stories/daily-updated-sea-ice-extent-time-series-plots>, último acceso Febrero 2022

- Similar fenómeno se observa en el hielo continental, en Groenlandia, con mediciones tomadas con altímetro Lidar y con gravimetría. Se calcula una pérdida de 286.000 millones de Tm / año (fig. 4).

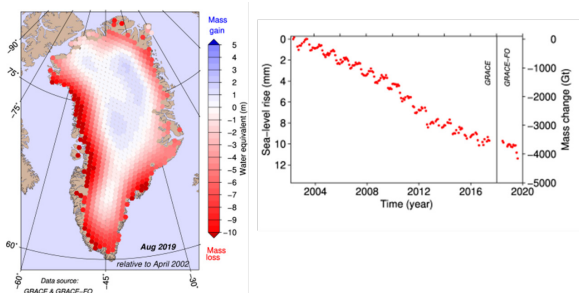


Fig. 4: Variaciones de hielo en Groenlandia: <http://polarportal.dk/en/greenland/mass-and-height-change/>

- La pérdida de hielo continental y la expansión térmica del agua explica las tendencias de aumento en el nivel del agua marina, que se vienen observando en las últimas décadas con altímetros radar. Se observa un aumento de unos 3.42 mm/año durante los últimos 20 años (fig. 5), con una clara tendencia ascendente (Cazenave & Cozannet, 2014).

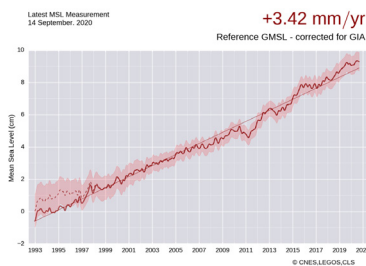


Fig. 5: Tendencias en la altura media del océano <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level.html>

En cuanto a las causas de ese calentamiento, la teledetección nos permite observar el claro incremento de la concentración de los gases de efecto invernadero,

que vienen midiéndose desde inicios de siglo por este medio (Buchwitz et al., 2018: fig. 6), complementándose las observaciones que se realizan con torres de flujo. Por su parte, sabemos también que la radiación solar se mantiene bastante estable (con los periodos cíclicos de unos 11 años), y que tampoco hay variación relevante en los ciclos orbitales del planeta. Ambos factores son la causa principal de los cambios climáticos que han afectado a la tierra en el último millón de años, pero no están variando ahora de modo significativo.

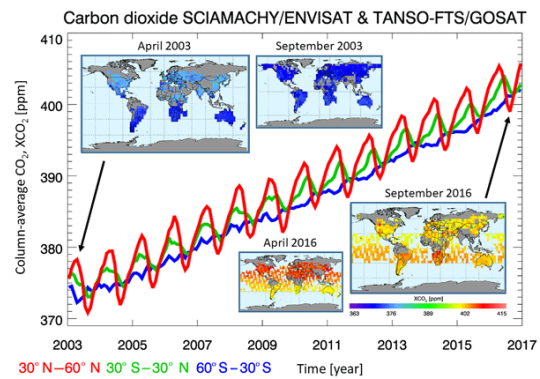


Fig. 6: Variaciones de la concentración de CO2 en la atmósfera a partir de datos de teledetección (Buchwitz et al., 2018).

Es bien sabido que el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera se debe principalmente a la actividad humana, con una pequeña contribución de los volcanes (Hards, 2005). Del total de las emisiones, se estima que el 90% proceden de la quema de combustibles fósiles y producción de cemento y el resto proviene del cambio de cobertura del suelo (degradación y quema de bosques que se convierten a cultivos) (Friedlingstein et al., 2020). La teledetección proporciona un valioso análisis de las tendencias en la cobertura del suelo a escala global, a partir de sensores de resolución media, complementados últimamente por otros de mayor resolución, que permiten estimaciones más precisas de la deforestación (Arévalo et al., 2020; Song et al., 2018).

Finalmente, en cuanto a los impactos previsibles de este calentamiento, la incertidumbre es mayor, ya que entra en juego la complejidad de los modelos climáticos y los escenarios de emisiones que puedan producirse. La teledetección nos proporciona también en esta fase información valiosa, sobre todo en lo referente al contraste de los modelos climáticos con las observaciones (Lauer et al., 2017), así como la rápida evaluación de efectos en situaciones de catástrofe natural como inundaciones o incendios (Kavvada et al., 2020).

ACTITUDES ÉTICAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

En múltiples ocasiones se ha debatido sobre la supuesta objetividad de la ciencia a la hora de analizar los problemas



ambientales y sociales (Artigas, 2017). Ciertamente, la ciencia experimental debe separar nítidamente entre observaciones e interpretaciones de la realidad, pero a la vez tiene la responsabilidad de informar certeramente sobre las causas y las consecuencias previsibles de un determinado fenómeno. Esta será una primera consecuencia ética ante el problema del cambio climático, el deber de mostrar el mejor conocimiento disponible, sin caer en simplicidades o catastrofismos, pero también sin rebajar la gravedad del problema.

Puede ser útil ilustrar la relevancia de mantener la máxima honestidad posible en presentar los avances científicos de este problema ambiental con el ejemplo de otra cuestión de gran impacto social que también tiene una base científica: el tabaquismo. Durante los años sesenta y setenta se comenzaron a evidenciar los impactos negativos para la salud del hábito de fumar. Los estudios científicos fueron haciéndose más concluyentes, hasta convertirse actualmente en una evidencia incontestable. En un reciente informe compilado por el departamento de salud y servicios humanos de EE.UU., se incluyen cifras verdaderamente demoledoras sobre el impacto que el tabaquismo (al que este informe denomina sin ambages, epidemia) ha producido en los últimos cincuenta años en ese país: 20 millones de muertes prematuras, con costes estimados (laborales y sanitarios) de 300.000 millones de dólares. Este informe, tras describir las enfermedades a las que está directamente ligado el tabaco, indica en un párrafo, que me parece especialmente demoledor, que "La epidemia del tabaco fue iniciada y se ha mantenido mediante estrategias agresivas de la industria del tabaco, que deliberadamente ha confundido al público sobre los riesgos de fumar cigarrillos" ([US Department of Health Human Services, 2014](#)): p. 7).

No parece necesario citar aquí el paralelismo con posturas similares por parte de grupos económicos ligados a los combustibles fósiles. Como científicos con conocimiento de los problemas ambientales, nuestra mejor contribución a su solución pasa por hacer buena ciencia, generando series temporales consistentes de datos precisos y exactos, con una adecuada estimación de sus incertidumbres asociadas. Ahora bien, me parece asimismo necesario apuntar nuestra responsabilidad para solucionar la raíz de los problemas que estudiamos. Considero que no basta con informar de las tendencias y sus riesgos asociados, sino que también nos corresponde involucrarnos más para revertirlas. A mi modo de ver, esto supone por un lado ser más activos en la divulgación del mejor conocimiento científico sobre las cuestiones ambientales que estudiamos, y por otro tener actitudes personales coherentes con nuestra visión de los problemas. En definitiva, se trata de subrayar la dimensión ética de las cuestiones ambientales ([Burgui & Chuvieco, 2017](#)), lo que a su vez también supone considerar los impactos de todo tipo que cada solución a

un determinado fenómeno implica, los agentes afectados por la misma y los valores que promueve o enturbia.

Ante un problema de dimensiones globales es fácil tomar actitudes displicentes, derivar responsabilidades en otros, apuntar a fuerzas sociales que tienen una repercusión más efectiva en los problemas y en las soluciones. Pero las actitudes sociales son siempre una suma de las actitudes personales, y un comportamiento tibio o indiferente de quienes cabría esperar una postura más firme, precisamente por conocer la gravedad del problema, tiene un impacto relevante en la opinión pública. Por otra parte, la influencia directa de nuestra actividad, por ejemplo, en el campo docente o en la formación de jóvenes investigadores, me parece que sólo es posible cuando existe un compromiso personal que permita extender las actitudes y los valores que necesitamos para cambiar la situación actual, ambientalmente insostenible.

Como sabiamente ha escrito el papa Francisco, la solución a los problemas actuales no puede restringirse a medidas urgentes y parciales. Es algo más profundo: "Debería ser una mirada distinta, un pensamiento, una política, un programa educativo, un estilo de vida y una espiritualidad que conformen una resistencia ante el avance del paradigma tecnocrático" ([Francisco, 2015: n. 194](#)). En suma, se precisa un cambio profundo para revertir las tendencias que están detrás del concepto actual de desarrollo, reorientándolo hacia un progreso que sea compatible con las demandas de la población más vulnerable y garantice la conservación de la naturaleza.

Junto a proponer ese nuevo modelo de progreso, me parece que como científicos ambientales también nuestro tenor personal debería reflejar los valores de sostenibilidad que proponemos. Esto afecta a múltiples ámbitos, desde nuestra forma de transportarnos a nuestro consumo, el tipo de energía que consumimos o el modo de alimentarnos ([van Valkengoed & Steg, 2019](#)). Si el principal factor del cambio climático actual es la emisión de gases de efecto invernadero, la clave de la mitigación pasa por reducir esas emisiones, si es posible manteniendo nuestro nivel de vida o al menos la parte más importante del mismo. Una forma de abordar científicamente esa reducción es el cálculo de la huella de carbono asociado a las actividades que realizamos, de cara a ser más conscientes de su relevancia. La huella de carbono implica acumular las emisiones que generan todos los procesos que requiere la producción de un determinado bien, en todo su ciclo de vida ([Burgui-Burgui & Chuvieco, 2020](#); [Smetschka et al., 2019](#)). La responsabilidad climática de los científicos debería considerar este tipo de información, tanto en su consumo personal, como en las actividades en las que se ve implicado.

Está en juego mucho, y aunque nuestra contribución



personal sea muy pequeña, me parece muy relevante que vaya en la misma línea que marca nuestro mejor conocimiento científico de los problemas. Ciertamente, la preocupación ambiental no explica completamente la huella de carbono personal, pero en una población adecuadamente informada, resulta un predictor muy relevante (Bruderer Enzler & Diekmann, 2019).

Aunque el consumo personal es el principal responsable de las emisiones globales (entre el 60 y el 70% según los países: (Ivanova & Büchs, 2020)), revertir procesos de gran calado no está en la mano del ciudadano de a pie, tampoco de los científicos. No obstante, parece imprescindible que tomemos decisiones más comprometidas en nuestra actividad cotidiana para reflejar la importancia del problema. La bella imagen de nuestro planeta que nos ofrecen los satélites de teledetección nos servirá de estímulo para trasvasarlo a las generaciones futuras en su integridad, reparando cuando sea posible los daños ya causados.

CONCLUSIONES

Hemos revisado algunas de las principales aportaciones de la teledetección al estudio del cambio climático, subrayando su capacidad para observar variables de interés climático de modo global, repetitivo y espacialmente comprensivo. Este conocimiento mejora la incertidumbre asociada a los modelos climáticos, facilitando predicciones más certeras, a la vez que permite detectar ya algunos signos de la existencia de esos cambios en el clima terrestre, principalmente a través de la observación de anomalías. Este mejor conocimiento del problema climático debería llevarnos a tomar decisiones más contundentes para su mitigación y para reducir las vulnerabilidades sociales que los nuevos escenarios prevén.

REFERENCIAS

Arévalo, P., Olofsson, P., & Woodcock, C. E. (2020). Continuous monitoring of land change activities and post-disturbance dynamics from Landsat time series: A test methodology for REDD+ reporting. *Remote Sensing of Environment*, 238, 111051. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.013>

Artigas, M. (2017). *Filosofía de la Ciencia*. EUNSA.

Bojinski, S., Verstraete, M., Peterson, T. C., Richter, C., Simmons, A., & Zemp, M. (2014). The concept of essential climate variables in support of climate research, applications, and policy. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(sep 14), 1431-1443. <https://doi.org/DOI:10.1175/BAMS-D-13-000471>

Bruderer Enzler, H., & Diekmann, A. (2019). All talk and no action? An analysis of environmental concern, income and greenhouse gas emissions in Switzerland. *Energy Research & Social Science*, 51, 12-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.01.001>

Buchwitz, M., Lavender, S., & Chuvieco, E. (2017). Special issue on earth observation of essential climate variables. *Remote Sensing of Environment*, 203, 1.

Buchwitz, M., Reuter, M., Schneising, O., Noël, S., Gier, B., Bovensmann, H., Burrows, J. P., Boesch, H., Anand, J., Parker, R. J., Somkuti, P., Detmers, R. G., Hasekamp, O. P., Aben, I., Butz, A., Kuze, A., Suto, H., Yoshida, Y., Crisp, D., & O'Dell, C. (2018). Computation and analysis of atmospheric carbon dioxide annual mean growth rates from satellite observations during 2003–2016. *Atmos. Chem. Phys.*, 18(23), 17355-17370. <https://doi.org/10.5194/acp-18-17355-2018>

Burgui-Burgui, M., & Chuvieco, E. (2020). Beyond Carbon Footprint Calculators. New Approaches for Linking Consumer Behaviour and Climate Action. *Sustainability*, 12(16), 6529. <https://doi.org/10.3390/su12166529>

Burgui, M., & Chuvieco, E. (2017). *Dimensiones éticas en los dilemas ambientales: estudio de casos*. Ediciones Internacionales Universitarias.

Cazenave, A., & Cozannet, G. L. (2014). Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*, 2(2), 15-34.

Chuvieco, E. (2020). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach*. 3rd Ed. CRC Press.

Cook, J., Nuccitelli, D., Green, S. A., Richardson, M., Winkler, B., Painting, R., Way, R., Jacobs, P., & Skuce, A. (2013). Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environmental research letters*, 8(2), 024024.

Cook, J., Oreskes, N., Doran, P. T., Anderegg, W. R. L., Verheggen, B., Maibach, E. W., Carlton, J. S., Lewandowsky, S., Skuce, A. G., Green, S. A., Nuccitelli, D., Jacobs, P., Richardson, M., Winkler, B., Painting, R., & Rice, K. (2016). Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming. *Environmental Research Letters*, 11(4), 048002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/048002>

Francisco (2015). Carta Encíclica Laudato si' sobre el cuidado de la casa común. https://www.vatican.va/content/dam/francesco/pdf/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_enciclica-laudato-si_sp.pdf

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão, L. E. O. C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N. R., Becker, M., Benoit-Cattin, A., Bittig, H. C., Bopp, L., Bultan, S., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L. P., Evans, W., Florentie, L., Forster, P. M., Gasser, T., Gehlen, M.,



- Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Gregor, L., Gruber, N., Harris, I., Hartung, K., Haverd, V., Houghton, R. A., Ilyina, T., Jain, A. K., Joetzjer, E., Kadono, K., Kato, E., Kitidis, V., Korsbakken, J. I., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozi, D., Marland, G., Metzl, N., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S. I., Niwa, Y., O'Brien, K., Ono, T., Palmer, P. I., Pierrot, D., Poulter, B., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Smith, A. J. P., Sutton, A. J., Tanhua, T., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., van der Werf, G., Vuichard, N., Walker, A. P., Wanninkhof, R., Watson, A. J., Willis, D., Wiltshire, A. J., Yuan, W., Yue, X., & Zaehle, S. (2020). Global Carbon Budget 2020. *Earth Syst. Sci. Data*, 12(4), 3269-3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- GCOS. (2016). *The Global Observing System for Climate: Implementation Needs*. GCOS-200. World Meteorological Organization.
- Hards, V. (2005). *Volcanic contributions to the global carbon cycle*. British Geological Survey.
- Hollmann, R., Merchant, C. J., Saunders, R. W., Downy, C., Buchwitz, M., Cazenave, A., Chuvieco, E., Defourny, P., Leeuw, G. D., Forsberg, R., Holzer-Popp, T., & Paul, F. (2013). The ESA Climate Change Initiative: satellite data records for essential climate variables. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, 1541-1552. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00254.1>
- Ivanova, D., & Büchs, M. (2020). Household Sharing for Carbon and Energy Reductions: The Case of EU Countries. *Energies*, 13(8), 1909. <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/8/1909>
- Kavvada, A., Metternicht, G., Kerblat, F., Mudau, N., Haldorson, M., Laldaparsad, S., Friedl, L., Held, A., & Chuvieco, E. (2020). Towards delivering on the sustainable development goals using earth observations. *Remote Sensing of Environment*, 247, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111930>. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111930>
- Lauer, A., Eyring, V., Righi, M., Buchwitz, M., Defourny, P., Evaldsson, M., Friedlingstein, P., de Jeu, R., de Leeuw, G., & Loew, A. (2017). Benchmarking CMIP5 models with a subset of ESA CCI Phase 2 data using the ESMValTool. *Remote Sensing of Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.007>
- Lázaro Touza, L., González Enríquez, C., & Escribano Francés, G. (2019). *Los españoles ante el cambio climático*. Real Instituto Elcano.
- Lehmann, A., Masò, J., Nativi, S., & Giuliani, G. (2020). Towards integrated essential variables for sustainability. *International Journal of Digital Earth*, 13(2), 158-165. <https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1636490>
- Lewandowsky, S., Cook, J., Fay, N., & Gignac, G. E. (2019). Science by social media: Attitudes towards climate change are mediated by perceived social consensus. *Memory & Cognition*, 47(8), 1445-1456. <https://doi.org/10.3758/s13421-019-00948-y>
- Popp, T., Hegglin, M. I., Hollmann, R., Arduin, F., Bartsch, A., Bastos, A., Bennett, V., Boutin, J., Brockmann, C., Buchwitz, M., Chuvieco, E., Ciais, P., Dorigo, W., Ghent, D., Jones, R., Lavergne, T., Merchant, C. J., Meyssignac, B., Paul, F., Quegan, S., Sathyendranath, S., Scanlon, T., Schröder, M., Simis, S. G. H., & Willén, U. (2020). Consistency of Satellite Climate Data Records for Earth System Monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(11), E1948-E1971. <https://doi.org/10.1175/bams-d-19-01271>
- Purkis, S. J., & Klemas, V. V. (2011). *Remote sensing and global environmental change*. John Wiley & Sons.
- Shepherd, A., Ivins, E., Rignot, E., Smith, B., van den Broeke, M., Velicogna, I., Whitehouse, P., Briggs, K., Joughin, I., Krinner, G., Nowicki, S., Payne, T., Scambos, T., Schlegel, N., A. G., Agosta, C., Ahlstrøm, A., Babonis, G., Barletta, V. R., Bjørk, A. A., Blazquez, A., Bonin, J., Colgan, W., Csatho, B., Cullather, R., Engdahl, M. E., Felikson, D., Fettweis, X., Forsberg, R., Hogg, A. E., Gallee, H., Gardner, A., Gilbert, L., Gourmelen, N., Groh, A., Gunter, B., Hanna, E., Harig, C., Helm, V., Horvath, A., Horwath, M., Khan, S., Kjeldsen, K. K., Konrad, H., Langen, P. L., Lecavalier, B., Loomis, B., Luthcke, S., McMillan, M., Melini, D., Mernild, S., Mohajerani, Y., Moore, P., Mottram, R., Mougnot, J., Moyano, G., Muir, A., Nagler, T., Niell, G., Nilsson, J., Noël, B., Otosaka, I., Pattle, M. E., Peltier, W. R., Pie, N., Rietbroek, R., Rott, H., Sandberg Sørensen, L., Sasgen, I., Save, H., Scheuchl, B., Schrama, E., Schröder, L., Seo, K.-W., Simonsen, S. B., Slater, T., Spada, G., Sutterley, T., Talpe, M., Tarasov, L., van de Berg, W. J., van der Wal, W., van Wessem, M., Vishwakarma, B. D., Wiese, D., Wilton, D., Wagner, T., Wouters, B., Wuite, J., & The, I. T. (2020). Mass balance of the Greenland Ice Sheet from 1992 to 2018. *Nature*, 579(7798), 233-239. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1855-2>
- Smetschka, B., Wiedenhofer, D., Egger, C., Haselsteiner, E., Moran, D., & Gaube, V. (2019). Time Matters: The Carbon Footprint of Everyday Activities in Austria. *Ecological Economics*, 164, 106357. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106357>
- Song, X.-P., Hansen, M. C., Stehman, S. V., Potapov, P. V., Tyukavina, A., Vermote, E. F., & Townshend, J. R. (2018). Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 560(7720), 639-643. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0411-9>
- Stammer, D., & Cazenave, A. (2017). *Satellite altimetry over oceans and land surfaces*. CRC Press.
- US Department of Health Human Services. (2014). *The health consequences of smoking—50 years of progress: a report of the Surgeon General* (Vol. 17). US Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Center for Chronic Disease Prevention and Health Promotion, Office on Smoking and



Health.

van Valkengoed, A. M., & Steg, L. (2019). Meta-analyses of factors motivating climate change adaptation behaviour. *Nature Climate Change*, 9(2), 158-163. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0371-y>

von Schuckmann, K., Cheng, L., Palmer, M. D., Hansen, J., Tassone, C., Aich, V., Adusumilli, S., Beltrami, H., Boyer, T., Cuesta-Valero, F. J., Desbruyères, D., Domingues, C., García-García, A., Gentine, P., Gilson, J., Gorfer, M., Haimberger, L., Ishii, M., Johnson, G. C., Killick, R., King, B. A., Kirchengast, G., Kolodziejczyk, N., Lyman, J., Marzeion, B., Mayer, M., Monier, M., Monselesan, D. P., Purkey, S., Roemmich, D., Schweiger, A., Seneviratne, S. I., Shepherd, A., Slater, D. A., Steiner, A. K., Straneo, F., Timmermans, M. L., & Wijffels, S. E. (2020). Heat stored in the Earth system: where does the energy go? *Earth Syst. Sci. Data*, 12(3), 2013-2041. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2013-2020>