

CAMBIO CLIMÁTICO

Ciencia, Impacto Global y Soluciones

Documento de estudio para estudiantes universitarios

1. Introducción al Cambio Climático

El cambio climático es uno de los desafíos más complejos y urgentes que enfrenta la humanidad en el siglo XXI. Se refiere a las transformaciones a largo plazo en las temperaturas, patrones de precipitación y otros indicadores del sistema climático de la Tierra, principalmente causadas por las actividades humanas desde la Revolución Industrial.

Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), la temperatura media global ha aumentado aproximadamente 1.1 °C desde la era preindustrial (1850-1900). Si no se toman medidas drásticas, se proyecta que el calentamiento podría alcanzar entre 1.5 °C y 4.4 °C hacia finales del siglo XXI, dependiendo de los escenarios de emisión.

Este documento explora las causas científicas del cambio climático, sus consecuencias medibles a nivel global y regional, los compromisos internacionales adoptados hasta la fecha y las estrategias de mitigación y adaptación disponibles.

2. Causas del Cambio Climático

2.1 El efecto invernadero natural y amplificado

El efecto invernadero es un proceso natural y esencial para la vida en la Tierra. Los gases de efecto invernadero (GEI) presentes en la atmósfera — como el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) — atrapan parte del calor solar que emite la superficie terrestre, manteniendo una temperatura media global de aproximadamente 15 °C. Sin este efecto, la temperatura promedio sería de -18 °C.

El problema actual radica en que las actividades humanas han amplificado este efecto al incrementar drásticamente la concentración de GEI en la atmósfera, generando un calentamiento adicional no natural.

2.2 Principales gases de efecto invernadero y sus fuentes

Gas	Símbolo	Fuente Principal	Potencial de Calentamiento (100 años)	Tiempo en atmósfera
Dióxido de carbono	CO ₂	Quema de combustibles fósiles, deforestación	1 (referencia)	20-200 años
Metano	CH ₄	Ganadería, vertederos, extracción de gas natural	28-36 veces más que CO ₂	12 años
Óxido nitroso	N ₂ O	Fertilizantes agrícolas, industria química	265-298 veces más que CO ₂	114 años

Gas	Símbolo	Fuente Principal	Potencial de Calentamiento (100 años)	Tiempo en atmósfera
HFCs / CFCs	HFC/CFC	Refrigeración, aerosoles industriales	Hasta 23.000 veces más	Décadas a siglos
Vapor de agua	H ₂ O	Evaporación natural (amplificada por calentamiento)	Variable	Días a semanas

2.3 Sectores económicos responsables de las emisiones globales

De acuerdo con los datos del Global Carbon Project (2023), la distribución de emisiones globales de CO₂ por sector es la siguiente:

- Energía eléctrica y calefacción: 25% del total global
- Agricultura, silvicultura y uso del suelo: 24%
- Industria (cemento, acero, químicos): 21%
- Transporte (terrestre, aéreo, marítimo): 14%
- Edificios y construcción: 6%
- Otros sectores: 10%

China es actualmente el mayor emisor individual con un 31% de las emisiones globales anuales, seguida por Estados Unidos (14%), la Unión Europea (8%) e India (7%). Sin embargo, en términos de emisiones históricas acumuladas desde 1750, Estados Unidos sigue siendo el principal responsable.

3. Evidencias Científicas del Cambio Climático

3.1 Indicadores observables

La comunidad científica ha documentado múltiples indicadores físicos del cambio climático con datos medidos de forma sistemática:

- Temperatura global: La década 2011-2020 fue la más cálida registrada. Los 10 años más calurosos desde 1850 han ocurrido todos después del año 2000.
- Nivel del mar: Ha subido en promedio 3.6 mm por año desde 1993, el doble que la tasa registrada durante el siglo XX. Actualmente el nivel es 20 cm más alto que en 1900.
- Hielo ártico: La extensión mínima anual del hielo marino ártico se ha reducido en aproximadamente un 13% por década desde 1979.
- Glaciares: Más del 90% de los glaciares monitoreados globalmente están en retroceso. El glaciar Quelccaya en Perú retrocedió 60 metros por año entre 1963 y 2005.

- Acidificación del océano: El pH oceánico ha bajado de 8.2 a 8.1 desde la era preindustrial, un aumento del 26% en acidez que afecta directamente a organismos con esqueleto calcáreo.
- Concentración de CO₂: Alcanzó 421 partes por millón (ppm) en 2023, el nivel más alto en al menos 3 millones de años. El nivel preindustrial era de 280 ppm.

3.2 Datos clave de temperatura (anomalías respecto a 1850-1900)

Período / Año	Anomalía de temperatura	Evento destacado
1850-1900	0.0 °C (referencia)	Era preindustrial, inicio de registros sistemáticos
1950	+0.2 °C	Inicio de la aceleración industrial post-Segunda Guerra Mundial
1980	+0.3 °C	Primeros informes científicos serios sobre el calentamiento global
1998	+0.6 °C	Año de El Niño más intenso del siglo XX
2016	+1.2 °C	Hasta ese momento, el año más cálido registrado
2020	+1.2 °C	Empata como el año más cálido; inicio de pandemia COVID-19
2023	+1.45 °C	Año más cálido registrado; primera vez que se superan los 1.5 °C en meses individuales
2024 (proyección)	+1.5 °C o más	Posible primer año calendario en superar el umbral de 1.5 °C

4. Consecuencias del Cambio Climático

4.1 Impactos en ecosistemas y biodiversidad

El cambio climático está alterando los ecosistemas a una velocidad sin precedentes en la historia reciente de la Tierra. Se estima que entre el 20% y el 30% de las especies evaluadas enfrentan riesgo de extinción si la temperatura supera los 2 °C.

- Blanqueamiento de corales: La Gran Barrera de Coral (Australia) ha experimentado 5 episodios masivos de blanqueamiento desde 1998. En 2022, el 91% de los corales monitoreados mostraron algún grado de blanqueamiento.
- Desplazamiento de especies: Numerosas especies están migrando hacia los polos o a mayores altitudes. La trucha de agua fría ha perdido el 50% de su hábitat en ríos de América del Norte desde 1970.

- Fenología alterada: Las plantas florecen 2-3 semanas antes de lo habitual en zonas templadas, desincronizando ciclos entre polinizadores e insectos, lo que amenaza cadenas alimentarias completas.

4.2 Impactos en la sociedad humana

Los efectos del cambio climático no son solo ambientales; tienen profundas consecuencias sociales, económicas y de salud pública:

- Seguridad alimentaria: La productividad agrícola de cultivos como el trigo y el maíz podría reducirse un 25% por cada grado adicional de calentamiento en zonas tropicales.
- Desplazados climáticos: El Banco Mundial estima que entre 216 y 1.000 millones de personas podrían verse forzadas a migrar internamente para 2050 si no se toman medidas urgentes.
- Eventos extremos: La frecuencia e intensidad de huracanes, sequías, inundaciones y olas de calor se ha incrementado. La ola de calor europea de 2003 causó más de 70.000 muertes prematuras.
- Economía global: El costo económico del cambio climático sin acción podría representar entre el 5% y el 20% del PIB mundial anual para finales de siglo, según el Informe Stern.
- Salud pública: Se proyecta que para 2030, el cambio climático causará 250.000 muertes adicionales por año debido a malnutrición, malaria, diarrea y estrés por calor.

4.3 Comparación de impactos por escenario de calentamiento

Impacto	+1.5 °C	+2.0 °C	+3.0 °C o más
Riesgo de extinción de especies	~6% de insectos	~18% de insectos	~49% de insectos
Aumento del nivel del mar (2100)	~0.26 a 0.77 m	~0.36 a 0.87 m	Más de 1 m
Personas expuestas a olas de calor extremas (cada 5 años)	~14% de la población	~37% de la población	Más del 50%
Reducción en pesca oceánica	~1.5 millones de toneladas	~3 millones de toneladas	Hasta 6 millones
Pérdida de arrecifes de coral	70-90%	Más del 99%	Extinción funcional
Personas sin agua suficiente	271 millones adicionales	388 millones adicionales	Más de 500 millones

5. Línea de Tiempo: Hitos Clave en la Historia del Cambio Climático

Año	Evento
1824	Joseph Fourier describe por primera vez el efecto invernadero natural
1896	Svante Arrhenius calcula que duplicar el CO ₂ atmosférico aumentaría la temperatura global en 5-6 °C
1958	Charles Keeling comienza mediciones sistemáticas de CO ₂ en Mauna Loa, Hawái (Curva de Keeling)
1979	Primera Conferencia Mundial sobre el Clima celebrada en Ginebra; primeras alertas institucionales
1988	Fundación del IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático) por la ONU y la OMM
1992	Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro; adopción de la Convención Marco de la ONU sobre Cambio Climático (CMNUCC)
1997	Protocolo de Kioto: primeros compromisos legalmente vinculantes de reducción de emisiones para países desarrollados
2006	Informe Stern sobre la economía del cambio climático; primera evaluación económica exhaustiva del problema
2007	El IPCC y Al Gore reciben el Premio Nobel de la Paz por su trabajo sobre el cambio climático
2015	Acuerdo de París: 196 países se comprometen a limitar el calentamiento a 1.5-2 °C. Entra en vigor en 2016
2018	Informe especial del IPCC sobre 1.5 °C alerta sobre la urgencia de actuar antes de 2030
2019	Movimiento Fridays for Future y Greta Thunberg movilizan a millones de jóvenes en más de 150 países
2021	COP26 en Glasgow: nuevos compromisos de reducción de carbono, pero considerados insuficientes por científicos
2023	Año más caluroso registrado; julio de 2023 fue el mes más caliente en la historia de la humanidad
2024	El mundo supera por primera vez el umbral de 1.5 °C de calentamiento en un año calendario completo

6. Marco Internacional y Compromisos Climáticos

6.1 El Acuerdo de París (2015)

El Acuerdo de París es el instrumento jurídico internacional más importante en materia de cambio climático. Sus objetivos principales son:

- Limitar el aumento de la temperatura global muy por debajo de los 2 °C por encima de los niveles preindustriales, y procurar esfuerzos para limitarlo a 1.5 °C.
- Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia climática.
- Hacer que los flujos financieros sean compatibles con un desarrollo bajo en emisiones y resiliente al clima.

Cada país presenta Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés), que deben actualizarse y aumentarse cada 5 años. Sin embargo, análisis independientes como el de Climate Action Tracker indican que los compromisos actuales llevan a un calentamiento de 2.4-2.7 °C para 2100.

6.2 Compromisos de países clave

País / Bloque	Meta de reducción	Año meta	Neutralidad de carbono
Unión Europea	Reducir 55% respecto a 1990	2030	2050
Estados Unidos	Reducir 50-52% respecto a 2005	2030	2050
China	Alcanzar pico de emisiones	Antes de 2030	2060
India	Reducir intensidad de carbono 45%	2030	2070
Brasil	Reducir 50% respecto a 2005	2030	2050
Reino Unido	Reducir 68% respecto a 1990	2030	2050
Japón	Reducir 46% respecto a 2013	2030	2050

7. Estrategias de Mitigación y Adaptación

7.1 Mitigación: reducir las causas

La mitigación se enfoca en reducir o evitar las emisiones de GEI para frenar el calentamiento. Las principales estrategias incluyen:

Transición energética

- Las energías renovables (solar, eólica, hidráulica, geotérmica) representaron el 30% de la electricidad mundial en 2023, frente al 19% en 2010.
- El costo de la energía solar fotovoltaica se ha reducido un 90% en la última década, convirtiéndola en la fuente de electricidad más barata de la historia en muchas regiones.
- Se estima que para descarbonizar el sector eléctrico global se necesitan inversiones de 4 billones de dólares anuales hasta 2030.

Transporte sostenible

- Los vehículos eléctricos (VE) representaron el 14% de las ventas globales de automóviles en 2023, con China liderando con el 35% de sus ventas.
- La aviación y el transporte marítimo siguen siendo los sectores más difíciles de descarbonizar, representando juntos un 5% de las emisiones globales.

Agricultura y uso del suelo

- La restauración de bosques y la reforestación podrían absorber entre 1 y 2 gigatoneladas de CO₂ al año para 2030.
- Cambios en dietas hacia menor consumo de carne roja podrían reducir las emisiones del sector agrícola hasta un 70%.

7.2 Adaptación: prepararse para los cambios

La adaptación reconoce que cierto nivel de cambio climático ya es inevitable y busca reducir la vulnerabilidad de los sistemas humanos y naturales. Ejemplos concretos:

- Infraestructura costera: Países Bajos ha invertido más de 20.000 millones de euros en diques y barreras contra inundaciones. Bangladesh construye islas flotantes para comunidades vulnerables.
- Agricultura resiliente: Desarrollo de variedades de cultivos resistentes a la sequía y al calor. En África subsahariana, la adopción de cultivos tolerantes ha aumentado la productividad un 20-30%.
- Sistemas de alerta temprana: La ONU estima que invertir 800 millones de dólares en sistemas de alerta podría evitar pérdidas anuales de hasta 3.000 millones de dólares.
- Ciudades verdes: Incorporación de tejados verdes, parques urbanos y superficies permeables para reducir el efecto de isla de calor urbana.

7.3 Tecnologías emergentes

Tecnología	Descripción	Estado actual	Potencial de reducción
Captura y almacenamiento de carbono (CCS)	Captura CO ₂ en fuentes industriales y lo inyecta bajo tierra	Operacional a pequeña escala	Hasta 6 Gt CO ₂ /año

Tecnología	Descripción	Estado actual	Potencial de reducción
Hidrógeno verde	Producido con energía renovable para reemplazar combustibles fósiles en industria y transporte	Fase de escalado	Hasta 20% de emisiones globales
Energía nuclear de fusión	Energía limpia e ilimitada replicando el proceso solar	En investigación (ITER)	Potencial transformador a largo plazo
Geoingeniería solar	Reflejar luz solar hacia el espacio para reducir temperatura	Muy experimental y controvertida	Reducción temporal de temperatura
Biochar	Carbón vegetal que almacena carbono en suelos y mejora su fertilidad	Aplicado en agricultura	Hasta 2 Gt CO ₂ /año

8. Casos Reales y Ejemplos Prácticos

8.1 El deshielo del Ártico y sus consecuencias globales

El Ártico se está calentando 4 veces más rápido que el promedio global, fenómeno conocido como amplificación ártica. Este calentamiento desproporcionado se debe a la pérdida de hielo reflectante que expone el océano oscuro, el cual absorbe más calor.

En 2012, la extensión mínima de hielo ártico alcanzó el récord más bajo registrado: 3.41 millones de km², un 49% menos que el promedio de 1979-2000. Las consecuencias se extienden globalmente: la disrupción del vórtice polar ártico provoca eventos de frío extremo en latitudes medias, como la crisis invernal de Texas en 2021 que dejó más de 200 muertos y pérdidas por 195.000 millones de dólares.

8.2 Las inundaciones de Pakistán (2022)

En el verano de 2022, Pakistán sufrió las inundaciones más devastadoras de su historia. Las lluvias del monzón, amplificadas por el cambio climático, cubrieron bajo el agua un tercio del país. El balance fue catastrófico: más de 1.700 muertes, 33 millones de personas afectadas, 2 millones de viviendas destruidas y pérdidas económicas estimadas en 30.000 millones de dólares.

Estudios de atribución climática determinaron que el cambio climático hizo estas lluvias extremas entre 50 y 75 veces más probables. Pakistán contribuye menos del 1% de las emisiones globales de CO₂, lo que generó un intenso debate internacional sobre justicia climática y responsabilidad histórica.

8.3 La transición energética de Costa Rica

Costa Rica es un caso ejemplar de descarbonización del sector eléctrico. En 2023, el 99.8% de su electricidad provino de fuentes renovables: 74% hidráulica, 12% geotérmica, 12% eólica y solar. El país ha alcanzado más de 300 días consecutivos de generación 100% renovable.

A pesar de representar solo el 0.03% de las emisiones globales, Costa Rica se ha fijado la meta de ser carbono neutral para 2050 y ha protegido el 30% de su territorio como área natural. Su éxito demuestra que la transición energética es técnicamente viable, aunque sus particularidades geográficas (abundancia de agua y volcanes) no son replicables en todos los contextos.

8.4 Las ciudades más amenazadas

Múltiples ciudades costeras enfrentan riesgos existenciales por la combinación de aumento del nivel del mar y hundimiento del suelo (subsistencia):

- Yakarta, Indonesia: Se hunde hasta 25 cm por año en algunas zonas. El gobierno indonesio planea trasladar la capital a Nusantara para 2045.
- Miami, Estados Unidos: Experimenta inundaciones por mareas altas (king tides) con creciente frecuencia. Se estima que 800.000 propiedades podrían quedar bajo el agua para 2100.
- Dhaka, Bangladesh: 35 millones de personas en el delta del Ganges-Brahmaputra están en riesgo de desplazamiento por inundaciones y salinización de acuíferos.
- Venecia, Italia: Sistema MOSE de barreras móviles costó 5.500 millones de euros y entró en operación en 2020 para proteger la ciudad de mareas excepcionales.

9. Glosario de Términos Científicos

Término	Definición
Albedo	Fracción de la radiación solar que refleja una superficie. El hielo tiene un albedo alto (~0.8) y el océano uno bajo (~0.06).
Acidificación oceánica	Disminución del pH del agua marina causada por la absorción de CO ₂ atmosférico, afectando a organismos con conchas calcáreas.
Carbono neutro	Estado en el que las emisiones de CO ₂ se compensan completamente mediante sumideros naturales o tecnológicos.
CCS (Carbon Capture and Storage)	Tecnología que captura CO ₂ directamente de fuentes industriales o la atmósfera y lo almacena de forma permanente bajo tierra.
Ciclo del carbono	Sistema de intercambio de carbono entre la atmósfera, océanos, suelos y organismos vivos, tanto en forma orgánica como inorgánica.
Forzamiento radiativo	Medida del desequilibrio energético causado por un agente climático. Valor positivo indica calentamiento; negativo, enfriamiento.

Término	Definición
Gases de efecto invernadero (GEI)	Gases atmosféricos que absorben y reemiten radiación infrarroja, atrapando calor: CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, vapor de agua, ozono, HFCs.
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Organismo de la ONU que evalúa la ciencia climática global y elabora informes de consenso.
Lazo de retroalimentación	Proceso en el que un cambio climático inicial genera efectos que amplifican (positivo) o reducen (negativo) el cambio original.
NDC (Nationally Determined Contribution)	Compromisos nacionales de reducción de emisiones presentados bajo el Acuerdo de París, revisables cada 5 años.
Permafrost	Suelo permanentemente congelado en regiones árticas y subárticas. Su deshielo libera grandes cantidades de CH ₄ y CO ₂ .
Punto de inflexión (tipping point)	Umbral crítico del sistema climático a partir del cual se produce un cambio irreversible y autoreforzante (ej. deshielo de la Antártida).
Resiliencia climática	Capacidad de un sistema —natural o humano— para anticipar, resistir, adaptarse y recuperarse de los impactos del cambio climático.
Sumidero de carbono	Sistema que absorbe más carbono del que emite. Los bosques, océanos y suelos son sumideros naturales fundamentales.
Temperatura preindustrial	Temperatura media global anterior a la Revolución Industrial (~1850), usada como línea de base para medir el calentamiento actual.

10. Referencias y Fuentes Recomendadas

Este documento fue elaborado con base en las siguientes fuentes científicas de referencia:

- IPCC (2021). Sixth Assessment Report (AR6): Climate Change 2021 — The Physical Science Basis. Cambridge University Press.
- IPCC (2022). AR6 Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability.
- Global Carbon Project (2023). Global Carbon Budget 2023.
- NASA Earth Observatory. Global Surface Temperature data. giss.nasa.gov
- NOAA Climate.gov. Annual Climate Reports 2020-2023.
- World Meteorological Organization (2023). State of the Global Climate 2023.
- Banco Mundial (2021). Groundswell: Acting on Internal Climate Migration.
- Climate Action Tracker (2023). Country assessments and global temperature projections. climateactiontracker.org
- Stern, N. (2007). The Stern Review on the Economics of Climate Change. HM Treasury, UK.
- IRENA (2023). Renewable Power Generation Costs in 2022. International Renewable Energy Agency.

— *Fin del documento* —