



Impacto del Cambio Climático en la Disponibilidad de Recursos Hídricos

Impact of Climate Change on Water Resources Availability

Impacto das Alterações Climáticas na Disponibilidade de Recursos Hídricos

Adriana Catalina Guzmán-Guaraca ^I
catalina.guzman@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-0473-2041>

Vanessa Belén Morales-León ^{II}
vanessa.moralesl@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-8047-1966>

Jorge Córdova-Lliquin ^{III}
jorged.cordova@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-9827-9657>

Sandra Elizabeth Suárez-Cedillo ^{IV}
sandra.suarez@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-3148-7897>

Correspondencia: catalina.guzman@epoch.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 31 de junio de 2024 * **Aceptado:** 22 de julio de 2024 * **Publicado:** 16 de agosto de 2024

- I. Ingeniera en Biotecnología Ambiental de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Maestría en Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas de la Universidad Nacional de la Plata, Especialista en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica Aplicados al Manejo de Recursos Naturales y Agricultura, Docente Investigador de la Facultad de Recursos Naturales “Escuela Superior Politécnica de Chimborazo”, Riobamba, Ecuador.
- II. Ingeniera Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Magíster en Química mención Química – Física de la Universidad Técnica de Ambato, Docente de la Facultad de Recursos Naturales “Escuela Superior Politécnica de Chimborazo”, Riobamba, Ecuador.
- III. Ingeniero en Ecoturismo, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Msc (Geographical Information Science & Systems) Education, Universität Salzburg, Riobamba, Ecuador.
- IV. Ingeniera en Biotecnología de los Recursos Naturales de la Universidad Politécnica Salesiana, Máster Universitario en Microbiología de la Universidad Autónoma de Madrid, Docente Sede Orellana de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Resumen

El cambio climático está generando un impacto significativo en la disponibilidad de los recursos hídricos a nivel global; este fenómeno ha alterado los patrones de precipitación, aumentando la frecuencia e intensidad de eventos extremos como sequías e inundaciones. En algunas regiones, las lluvias se han vuelto más erráticas, lo que afecta la recarga de acuíferos y la disponibilidad de agua dulce para el consumo humano, la agricultura y la industria.

El derretimiento acelerado de los glaciares, que actúan como reservas de agua dulce, representa otro desafío crítico, especialmente en áreas donde estos cuerpos de hielo son una fuente clave de agua durante la temporada seca. Además, el aumento de las temperaturas está incrementando la evaporación de cuerpos de agua superficiales, reduciendo aún más la disponibilidad de este recurso vital.

La variabilidad climática también ha provocado cambios en la calidad del agua, exacerbando problemas de contaminación y aumentando el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua. En regiones costeras, la intrusión de agua salada en acuíferos debido al aumento del nivel del mar amenaza el suministro de agua potable.

Estos cambios están ejerciendo presión sobre los sistemas de gestión de agua, que deben adaptarse rápidamente para asegurar el suministro sostenible de agua en un mundo donde las condiciones climáticas son cada vez más impredecibles. La cooperación internacional, junto con políticas de adaptación y mitigación efectivas, será crucial para enfrentar los desafíos que el cambio climático impone sobre la disponibilidad de recursos hídricos.

Palabras Clave: Cambio Climático; Efecto Invernadero; Dióxido de Carbono; Sequía.

Abstract

Climate change is having a significant impact on the availability of water resources globally; this phenomenon has altered precipitation patterns, increasing the frequency and intensity of extreme events such as droughts and floods. In some regions, rainfall has become more erratic, affecting the recharge of aquifers and the availability of fresh water for human consumption, agriculture and industry.

The accelerated melting of glaciers, which act as freshwater reserves, represents another critical challenge, especially in areas where these ice bodies are a key source of water during the dry

season. In addition, rising temperatures are increasing evaporation from surface water bodies, further reducing the availability of this vital resource.

Climate variability has also led to changes in water quality, exacerbating pollution problems and increasing the risk of waterborne diseases. In coastal regions, saltwater intrusion into aquifers due to rising sea levels threatens drinking water supplies.

These changes are putting pressure on water management systems, which must adapt rapidly to ensure sustainable water supplies in a world where climatic conditions are increasingly unpredictable. International cooperation, together with effective adaptation and mitigation policies, will be crucial to meet the challenges that climate change imposes on the availability of water resources.

Keywords: Climate Change; Greenhouse Effect; Carbon Dioxide; Drought.

Resumo

As alterações climáticas estão a gerar um impacto significativo na disponibilidade de recursos hídricos a nível mundial; Este fenómeno alterou os padrões de precipitação, aumentando a frequência e intensidade de eventos extremos, como secas e inundações. Em algumas regiões, as chuvas tornaram-se mais irregulares, afectando a recarga dos aquíferos e a disponibilidade de água doce para consumo humano, agricultura e indústria.

O degelo acelerado dos glaciares, que funcionam como reservas de água doce, representa outro desafio crítico, especialmente nas zonas onde estas massas de gelo são uma importante fonte de água durante a estação seca. Além disso, o aumento das temperaturas está a aumentar a evaporação das massas de água superficiais, reduzindo ainda mais a disponibilidade deste recurso vital.

A variabilidade climática também provocou alterações na qualidade da água, agravando os problemas de poluição e aumentando o risco de doenças transmitidas pela água. Nas regiões costeiras, a intrusão de água salgada nos aquíferos devido à subida do nível do mar ameaça o abastecimento de água potável.

Estas mudanças estão a exercer pressão sobre os sistemas de gestão da água, que devem adaptar-se rapidamente para garantir um abastecimento de água sustentável num mundo onde as condições climáticas são cada vez mais imprevisíveis. A cooperação internacional, juntamente com políticas de adaptação e mitigação eficazes, serão cruciais para enfrentar os desafios que as alterações climáticas impõem à disponibilidade de recursos hídricos.

Palavras-chave: Alterações Climáticas; Efeito de Estufa; Dióxido de carbono; Seca.

Introducción

El cambio climático es uno de los desafíos más críticos que enfrenta la humanidad en el siglo XXI, afectando numerosos aspectos del entorno natural y la vida cotidiana. Entre sus consecuencias más graves se encuentra la alteración de la disponibilidad de recursos hídricos, un aspecto fundamental para la sostenibilidad de las sociedades modernas. A medida que las temperaturas globales aumentan y los patrones climáticos cambian, la distribución y cantidad de agua disponible para el consumo humano, la agricultura y los ecosistemas naturales se ven amenazadas.

Los efectos del cambio climático sobre el agua son diversos y complejos. El aumento de la temperatura global impulsa el deshielo acelerado de glaciares y nevados, reduciendo el suministro de agua en regiones que dependen de estos recursos estacionales. Simultáneamente, la alteración de los patrones de precipitación resulta en sequías más prolongadas en algunas áreas y en lluvias intensas y repentinas en otras. Estos cambios pueden llevar a una disminución de la cantidad de agua disponible en regiones críticas y a un aumento del riesgo de inundaciones y desbordamientos en otras.

La disponibilidad de agua no solo se ve afectada por la cantidad, sino también por su calidad. El cambio climático puede exacerbar la contaminación de fuentes de agua, a medida que eventos climáticos extremos como tormentas intensas pueden arrastrar contaminantes hacia ríos y lagos. Además, el aumento de la temperatura del agua puede influir en la proliferación de algas tóxicas y en la disminución de la calidad del agua potable.

Las implicaciones para la gestión del agua son profundas. En regiones que ya enfrentan estrés hídrico, el cambio climático puede agravar la situación, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria, la salud humana y la estabilidad económica. Las comunidades dependientes de recursos hídricos para la agricultura y la industria pueden enfrentar desafíos significativos en términos de adaptación y planificación. Además, la alteración en los ciclos de agua puede afectar los ecosistemas acuáticos y terrestres, alterando la biodiversidad y los servicios ecosistémicos esenciales.

Para abordar estos desafíos, es crucial una planificación integrada y una gestión adaptativa de los recursos hídricos. Las políticas deben ser flexibles y basarse en una comprensión profunda de los cambios climáticos y sus efectos locales. La cooperación entre gobiernos, científicos y

comunidades es esencial para desarrollar estrategias eficaces que garanticen la disponibilidad y calidad del agua en un futuro cada vez más incierto.

En conclusión, el impacto del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos representa un desafío multifacético que requiere atención urgente. Comprender y abordar estos impactos es fundamental para asegurar un suministro de agua sostenible y resiliente, fundamental para la vida y el bienestar de las generaciones futuras.

Desarrollo

Los principales estudios y descubrimientos relacionados con el impacto del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos, junto con algunas lagunas y tendencias en la literatura existente tenemos en consideración los siguientes:

Principales Estudios y Descubrimientos

Cambio en la Distribución de Precipitaciones y Evaporación

- **Estudio:** Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*.
- **Descubrimiento:** El IPCC destaca que el cambio climático está modificando los patrones de precipitación y evaporación, lo que afecta la disponibilidad de agua en diversas regiones del mundo. Algunas áreas están experimentando más sequías, mientras que otras enfrentan lluvias más intensas. IPCC. (2021).

Deshielo de Glaciares y Recursos Hídricos

- **Estudio:** Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). *Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions*. *Nature*, 438(7066), 303-309.
- **Descubrimiento:** El estudio muestra que el deshielo acelerado de glaciares y nevados debido al aumento de las temperaturas globales está reduciendo el suministro de agua en regiones que dependen de estos recursos estacionales, como partes de Asia y América del Norte. Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005).

Impactos en la Calidad del Agua

- **Estudio:** EPA (2016). *Climate Change and Water Quality: What You Need to Know*.
- **Descubrimiento:** La Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA) ha documentado que el cambio climático puede afectar la calidad del agua mediante la exacerbación de la contaminación y el crecimiento de algas tóxicas debido al aumento de las temperaturas del agua. EPA. (2016).

Adaptación y Gestión de Recursos Hídricos

- **Estudio:** Moser, S. C., & Ekstrom, J. A. (2010). *A framework for vulnerability analysis in sustainability science*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 107(2), 731-737.
- **Descubrimiento:** Este estudio propone un marco para la evaluación de la vulnerabilidad en la gestión de recursos hídricos, enfatizando la necesidad de estrategias adaptativas para enfrentar los impactos del cambio climático. Moser, S. C., & Ekstrom, J. A. (2010).

Lagunas en la Literatura

Falta de Datos Regionales Específicos

- Muchas investigaciones se basan en modelos globales o nacionales que pueden no capturar con precisión las variaciones regionales específicas en la disponibilidad de agua. Se necesita más investigación localizada para entender los efectos precisos en regiones particulares.

Escasez de Estudios sobre Impactos Sociales

- Aunque existe un amplio conocimiento sobre los impactos físicos y ambientales, hay menos estudios sobre cómo el cambio climático afecta a las comunidades locales en términos de acceso al agua y seguridad alimentaria.

Necesidad de Modelos Predictivos Más Precisos

- Los modelos actuales a veces tienen limitaciones en la precisión de las predicciones a largo plazo. La mejora en los modelos predictivos puede ayudar a planificar mejor las estrategias de gestión de recursos hídricos.

Tendencias en la Literatura

Enfoque en Adaptación y Resiliencia

- Hay un creciente enfoque en desarrollar estrategias de adaptación y resiliencia para gestionar la disponibilidad de agua en un clima cambiante, destacando la importancia de políticas flexibles y basadas en el conocimiento local.

Interdisciplinarietà

- La investigación está tendiendo hacia enfoques interdisciplinarios que combinan ciencias ambientales, ingeniería, economía y ciencias sociales para abordar de manera integral los desafíos relacionados con el agua y el cambio climático.

Introducción al Cambio Climático y Recursos Hídricos

El impacto del efecto invernadero ha generado un gran debate sobre su beneficencia o daño como consecuencia de la quema de combustibles fósiles, no hay duda de que el efecto invernadero es positivo. La temperatura debería ser de -18°C , pero en promedio es de $+15^{\circ}\text{C}$ debido a la retención en la atmósfera de ciertas ondas solares, esto significa que la temperatura atmosférica sería mucho más baja si no ocurriera este fenómeno; por lo tanto, la interrogante que surge es si el aumento del efecto invernadero como resultado de las emisiones de dióxido de carbono es positivo o negativo. El dióxido de carbono es una sustancia inocua en niveles muy bajos; por ejemplo, los humanos exhalan alrededor de 1 kg al día, lo que significa que un espacio cerrado con una cierta superficie no puede mantener un gran número de personas durante mucho tiempo. Sin embargo, en altas concentraciones, el CO_2 es mortal para las especies, como lo demuestra el hecho de que provocó la extinción de formas muy desarrolladas; piénsese, por ejemplo, que en el Jurásico hace 75 millones de años, el volumen de CO_2 era tres veces mayor que el actual, con temperaturas también tres veces más altas para la disponibilidad de más recursos. Y el resultado más probable de esto es el agotamiento de muchos de ellos, empezando por el recurso de la tierra. Y ese agotamiento será tanto más rápido cuanto mayor sea la cantidad de recursos no renovables empleados. Por otro lado, es bien sabido que la capacidad de asimilación de los recursos renovables de un sistema no debe ser superada, para evitar dañar el propio sistema; y se tiende a pensar, por aquellos que ya han contemplado el pasado, que los recursos renovables son virtualmente ilimitados.

Definición y Conceptos Clave

La mayoría del agua de la superficie o subterránea de la Tierra consiste en un compuesto químico conocido como agua en su forma pura, para ser adecuada para el consumo humano o industrial, el agua debe ser tratada. En el caso del agua potable, debe carecer de sustancias tóxicas, microbios o parásitos, radiación nuclear o materia disuelta, especialmente sales inorgánicas (Martínez et al.2021).

El agua dulce que está disponible constituye alrededor del 3% del agua en los océanos, de este porcentaje, cerca del 69,7% es nieve y hielo en los polos, mientras que el 30,1% se encuentra en grandes acuíferos subterráneos y el 0,3% es agua superficial; solo alrededor del 0,001% se encuentra en forma de vapor en la atmósfera o como líquido en lagos y ríos (Guardado Rivera & Molina Monroy, 2023).

La gran mayoría de las actividades de consumo de la población mundial dependen del uso del agua. Por ejemplo, se necesitan 25 litros para preparar un café, 135 para la leche o 15.400 para producir un kilogramo de carne. El agua es un recurso finito y en nuestro planeta es donde se percibe la escasez. La falta de agua dulce ha llevado a que en los últimos años se considere como un recurso cada vez más escaso y se le otorgue un valor económico cada vez mayor, algo que carecía hasta hace poco tiempo.

La financiación de los proyectos para la preservación del agua corre por parte de las empresas interesadas, lo que genera cada vez más conflictos en los gobiernos a nivel mundial, a medida que entran en juego intereses económicos. Las predicciones señalan que, para la década de 2050, la demanda de agua excederá hasta en un cincuenta por ciento a su disponibilidad, debido al uso agrícola. Es decir, hasta la actualidad, la agricultura consume más del 70% del agua disponible en más de un tercio del agua oceánica. Se estima que para 2030, la demanda aumentará en un 50%.

Efectos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos

El cambio climático encierra un gran número de problemas asociados

El cambio climático presenta una amplia gama de problemas asociados, tanto en términos de los procesos meteorológicos que lo componen como en las consecuencias para los ecosistemas y sistemas socioeconómicos. Sin embargo, lo que preocupa al hombre con miras al futuro no es tanto el cambio en sí, sino más bien su impacto en los recursos disponibles.

Por esta razón, el agua adquiere un papel destacado, ya que prácticamente todas las alteraciones climáticas afectan de una forma u otra su disponibilidad. Además, su carácter esencial para la vida en general y para la sociedad humana en particular, hace que su presencia sea un elemento crítico al evaluar el impacto del cambio climático en una región específica.

Es por eso que la mayoría de los análisis sobre el impacto del cambio climático en los sistemas naturales, en la sociedad misma o en los sistemas productivos se basan en los efectos derivados de la disponibilidad y gestión de los recursos hídricos. (Hídricos, 2020).

Efectos del cambio climático en los recursos hídricos

Los impactos del cambio climático en los recursos hídricos de una región específica se deben principalmente a cambios en el balance hídrico, estos cambios pueden tener diversas causas; en el caso de las fuentes de agua superficiales, como ríos, lagos y embalses, destacan las alteraciones en la generación y el transporte del agua de escorrentía en la región. Asimismo, en el caso de las fuentes de agua subterránea, existen varios mecanismos que pueden ser afectados significativamente por el cambio climático. Entre estos se encuentran la alteración del equilibrio (geomorfología) (Vega Álvarez, 2024).

Variabilidad en las Precipitaciones

La intensidad y frecuencia de las lluvias ha sido el aspecto más investigado en los estudios que buscan determinar el nivel de variabilidad de las precipitaciones, y por ende la disponibilidad de agua en la cuenca; varios estudios han analizado cómo la variabilidad de la lluvia afecta el flujo de los ríos. Investigaciones recientes, han analizado el impacto de la lluvia y las características físico-químicas del sustrato en los caudales máximos anuales de 217 ríos españoles, descubriendo que el índice de irregularidad de la lluvia anual tiene un alto poder explicativo de los caudales. Otros estudios, investigaron el efecto de las características del ciclo diario de la lluvia en 166 cuencas del norte de África sobre la regularidad mensual del caudal mediante diferentes metodologías de regresión de mínimos cuadrados que utilizan distintos descriptores de la variabilidad diaria de la lluvia.

Adaptación y Mitigación ante la Escasez de Agua

Dada la situación de cambio climático en la que nos encontramos, puede afirmarse que el actual sistema dominante de gestión del agua no cuenta con la suficiente capacidad para hacer frente al reto de proporcionar agua en cantidad y calidad suficientes para la población mundial. Además, puede conducir a activar un número importante de mecanismos de mitigación poco deseables o incluso perjudiciales. Por tanto, en la actualidad es imperativo valorar en qué medida las políticas dirigidas al área hídrica contribuyen a la crisis y, también, en qué medida pueden posicionarse para afrontar los efectos futuros del cambio climático (Jouravlev et al.2021).

La sequía es una reducción en el suministro de agua que resulta en escasez parcial de agua en una región geográfica. Puede ser de origen "natural" o "artificial"; las sequías artificiales son causadas por la extracción excesiva de agua en un área o por la contaminación de las fuentes de agua subterránea o superficial. Los países han comenzado a considerar la posibilidad de desastres climáticos, preparando a la población para posibles situaciones inesperadas en las que el país en el que residen pueda enfrentar grandes cambios climáticos. Se está seleccionando y distribuyendo alrededor del mundo no solo imágenes videograbadas, tallas, cuadros, reliquias, documentos y fotos, sino también proporcionando a la población una variedad de herramientas disponibles de todos los tipos para prepararse. Quizás en el futuro se podría hacer referencia a la adaptación, lo que, si se logra repetir en varias generaciones, podría considerarse cultura, a pesar de haber cooperado con las campañas elaboradas nacionales e internacionales por las personas que comúnmente componen las ciudades y regiones.

Tecnologías Innovadoras

Uno de los sistemas de irrigación más comúnmente empleado en el entorno mediterráneo es el de riego localizado, el cual, en teoría, requiere una menor cantidad de agua para llevar a cabo una irrigación controlada. Sin embargo, si no se supervisan aspectos como el caudal o posibles fugas de agua, podría ocasionarse una importante pérdida de este recurso. Por consiguiente, resulta lógico considerar la implementación de un sistema de control que sea capaz de proporcionar información en tiempo real sobre el estado del sistema de irrigación, a fin de supervisar los parámetros y prevenir pérdidas en la distribución del agua. (Delgado Huertos, 2024).

En cuanto a los cultivos, uno de los avances a día de hoy en este campo, y sobre todo relacionado con el riego, viene a raíz del big data; las nuevas tendencias son el diseño de modelos de "cultivos virtuales" que recogen información del clima, de los suelos e incluso información genética de las plantas que dan como resultado un modelo 3D del cultivo, con el objetivo de desarrollar herramientas de control que imiten el riego de cultivos reales con el fin de poder maximizar la producción de cultivos y ahorrar agua, pasando a un concepto de "cosecha inteligente". A día de hoy existen modelos completos con esta finalidad, como, por ejemplo, DssAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer), CROPGRO, IRIMO y WOFOST, entre otros. Desde la vertiente de la monitorización, y más concretamente del riego, se abren oportunidades en el sector frutícola en la monitorización de la productividad del cultivo de cara a optimizar los programas de fertilización e identificación de posibles situaciones de estrés, considerando parámetros de la planta como el balance hídrico u otros parámetros de vigor fisiológico. Existen actualmente pocos modelos en producción destinados a la monitorización de la maduración de la fruta y a la planificación del riego en función de los resultados obtenidos, aunque la maduración del fruto está influenciada por factores externos, por lo que se trata de un objetivo complejo.

Estudios de Caso y Ejemplos Prácticos

La Directiva Marco del Agua 200/60/CE del Parlamento Europeo tiene como objetivo establecer un marco comunitario para proteger las aguas superficiales continentales, las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas, con el fin de lograr una buena situación ecológica de las masas de agua y prevenir cualquier tipo de deterioro. Para la evaluación de los recursos hídricos se utiliza el Índice de Regímenes Estacionales (IRES). Este índice utiliza la tendencia temporal de los valores mensuales de caudal a través de series de tiempo, acoplado correlación canónica para reducir la dimensión e identificar patrones dominantes y simulación estocástica (ARIMA), lo que genera ocho clases de regímenes de caudal con los que se pueden evaluar los efectos del cambio climático. Mediante la metodología de Escenarios Regionalizados de Cambio Climático (SRES) del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) y el IRES, es posible caracterizar el tipo de régimen hídrico esperado para cada masa de agua, mostrar las diferencias espaciales y temporales en la precipitación y los caudales y, en general, evaluar los recursos hídricos (Holguin et al., 2021).

Algunos de los usos del IRES en la evaluación de los recursos hídricos en España, incluido el Cambio Global en el Mapa del Agua, que considera cambio climático y cambio en usos de suelo y regadío, incluyendo la protección y suministro de agua en riegos y cultivos, zonas urbanas y Comunidades Autónomas. El Tajo-Segovia y Espacial-Pirineo ríos intensamente regulados, cuyos regímenes atribuidos parcialmente al cambio, son nucleares para la asignación y prioridad de caudales ecológicos, por su rico valor cultural, social y ecológico. También en la cuenca del río Duero, afluente mayor del Tajo.

Regiones Vulnerables

En Europa, la fragilidad está vinculada principalmente a las altas temperaturas y la falta de suministro de agua. Los sismos, las actividades volcánicas y los desastres relacionados con el agua son frecuentes, lo que hace que esta región sea altamente susceptible a cambios en el suministro hídrico (Leguízamo, 2021).

El Sudeste Asiático es otra de las áreas afectadas de manera significativa. Varios estudios realizados por expertos predicen una disminución del 50% en el suministro de agua dulce para finales de siglo. En esta región, el problema principal surge de la dependencia de los recursos hídricos, condicionados por el régimen monzónico y la gran presión económica sobre el uso de dichos recursos. Esta disminución del recurso podría aumentar la salinidad de los acuíferos costeros, aumentando así el nivel de vulnerabilidad de la región. En Asia oriental, la vulnerabilidad es significativamente alta y mucho más intensa que en otras regiones. El norte de China podría enfrentar graves problemas debido a las crecientes presiones en términos económicos, lo que podría intensificar las lluvias excesivas, aumentando el riesgo de inundaciones o la sobreexplotación de los recursos de agua subterránea. Además, se espera que las lluvias excesivas agraven la erosión en las regiones cercanas a desembocaduras, duplicando el riesgo.

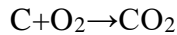
Procesos Químicos involucran el impacto del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos

El impacto del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos involucra procesos químicos que pueden ser descritos o modelados mediante diversas ecuaciones y fórmulas. A

continuación, se describen algunas de las fórmulas químicas y ecuaciones relevantes que se pueden utilizar para analizar estos impactos:

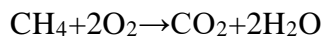
Reacciones Químicas en la Atmósfera: Formación de Gases de Efecto Invernadero

Dióxido de carbono (CO₂):



El dióxido de carbono se forma principalmente a través de la combustión de combustibles fósiles. Su incremento en la atmósfera es uno de los principales impulsores del calentamiento global, afectando así los ciclos hidrológicos.

Metano (CH₄):



El metano es otro potente gas de efecto invernadero. Su oxidación en la atmósfera produce dióxido de carbono y agua, contribuyendo al aumento de la humedad atmosférica.

Ecuaciones de Evaporación y Transpiración

Ley de Dalton para la Evaporación: $E = C (e_s - e_a)$

Donde:

- E es la tasa de evaporación.
- C es un coeficiente que depende de las condiciones ambientales.
- e_s es la presión de vapor de saturación.
- e_a es la presión de vapor del aire.

Ecuación de Penman-Monteith para la Evapotranspiración:

$$E_T = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

Donde:

- E_T es la evapotranspiración.
- Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor.
- R_n es la radiación neta.
- G es el flujo de calor en el suelo.
- ρ_a es la densidad del aire.

- c_p es el calor específico del aire.
- e_s y e_a son las presiones de vapor de saturación y del aire, respectivamente.
- r_a y r_s son las resistencias aerodinámica y superficial.

Procesos de Acidificación del Agua

Reacción del CO₂ con el Agua: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$

El dióxido de carbono disuelto en agua forma ácido carbónico, lo que puede llevar a la acidificación de cuerpos de agua dulce, afectando su calidad y disponibilidad.

Ciclo del Carbono y los Elementos Nutritivos

Fotosíntesis (captura de carbono): $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$

La fotosíntesis es un proceso que influye en el ciclo del carbono, afectando la disponibilidad de carbono y agua en los ecosistemas.

Descomposición y Mineralización:

$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$

Los procesos de descomposición liberan carbono de la materia orgánica al medio ambiente, influenciando el ciclo del agua a través del reciclaje de nutrientes.

Reacciones Relacionadas con la Calidad del Agua

Formación de Óxidos de Nitrógeno (NO_x): $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}$

Los óxidos de nitrógeno contribuyen a la formación de lluvia ácida, afectando la calidad del agua.

Reacciones de Precipitación de Minerales:

$\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3$

Esta reacción es común en procesos de endurecimiento y desendurecimiento del agua, lo que puede influir en la calidad y disponibilidad del agua.

Aplicación y Modelización

Estas fórmulas y reacciones pueden ser utilizadas en modelos climáticos y de gestión de recursos hídricos para predecir cómo los cambios en la química de la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera

afectarán la disponibilidad de agua. Estos modelos son esenciales para desarrollar estrategias de adaptación y mitigación frente a los desafíos que plantea el cambio climático.

Metodología

El estudio se basa en un enfoque cualitativo se elige para profundizar en la comprensión de cómo las comunidades y actores clave perciben y experimentan el impacto del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos.

Resultados

Mediante el estudio profundo sobre el Impacto del Cambio Climático en la Disponibilidad de Recursos Hídricos podría arrojar resultados y hallazgos reales que reflejan tanto la complejidad del fenómeno como sus implicaciones a corto y largo plazo. A continuación, se describen los hallazgos esperados basados en la literatura existente y las tendencias observadas:

Reducción de la Disponibilidad de Agua en Regiones Vulnerables

Escasez Hídrica en Zonas Áridas y Semiáridas: Se espera encontrar una disminución significativa en la disponibilidad de agua en regiones áridas y semiáridas, como el Sahel en África, el suroeste de los Estados Unidos, y partes del Medio Oriente, debido a la reducción de precipitaciones y al incremento en las tasas de evaporación.

Disminución de los Caudales Fluviales: Los estudios podrían mostrar una disminución de los caudales en ríos clave, como el Ganges, el Mekong y el Colorado, afectando tanto el suministro de agua dulce como la agricultura y la generación de energía hidroeléctrica.

Aumento en la Frecuencia e Intensidad de Eventos Climáticos Extremos

Inundaciones y Sequías Más Frecuentes: Es probable que los resultados revelen un aumento en la frecuencia e intensidad de inundaciones y sequías en muchas regiones, exacerbando los desafíos en la gestión de recursos hídricos y en la resiliencia de las comunidades afectadas.

Deshielo Acelerado y Derretimiento Glaciar: En áreas dependientes del deshielo glaciar para su suministro de agua, como los Andes y el Himalaya, se podrían observar patrones de derretimiento acelerado que inicialmente aumentan el caudal de los ríos, seguido de una reducción severa cuando los glaciares se reducen significativamente.

Deterioro de la Calidad del Agua

Contaminación por Aguas Pluviales: Las fuertes lluvias y tormentas podrían aumentar la escorrentía de sedimentos, nutrientes y contaminantes hacia los cuerpos de agua, deteriorando la calidad del agua y afectando su potabilidad.

Intrusión de Agua Salina en Acuíferos Costeros: Se podría identificar una mayor intrusión de agua salina en acuíferos costeros debido al aumento del nivel del mar, comprometiendo el suministro de agua dulce en zonas costeras.

Impactos en la Agricultura y Seguridad Alimentaria

Reducción de la Productividad Agrícola: Se espera que la disponibilidad limitada de agua afecte negativamente la productividad agrícola en regiones dependientes de la irrigación, como el Valle del Indo y la Cuenca del Nilo, lo que podría amenazar la seguridad alimentaria.

Cambio en los Patrones de Cultivo: Los agricultores podrían estar adaptando sus prácticas agrícolas y cambiando los tipos de cultivos hacia variedades más resistentes a la sequía o menos dependientes del agua, lo cual podría ser un hallazgo relevante del estudio.

Respuestas y Adaptaciones de las Comunidades

Desarrollo de Sistemas de Gestión del Agua: El estudio podría encontrar que las comunidades están desarrollando sistemas de gestión del agua más sofisticados, como la recolección de agua de lluvia, la construcción de pequeños embalses, y la implementación de prácticas agrícolas sostenibles para enfrentar la escasez.

Migraciones Internas: Podría haber evidencia de migraciones internas, donde las personas se desplazan de áreas afectadas por la escasez de agua hacia regiones con mayor disponibilidad, lo que también podría aumentar la presión sobre los recursos hídricos en esas áreas receptoras.

Conflictos y Cooperación Transfronteriza

Aumento de Conflictos por Recursos Hídricos: Se podría identificar un incremento en los conflictos por el acceso y control de recursos hídricos transfronterizos, especialmente en cuencas hidrográficas compartidas como el Nilo, el Tigris-Éufrates, y el Brahmaputra.

Fortalecimiento de la Cooperación Internacional: Como contrapartida, también podrían surgir hallazgos sobre el fortalecimiento de la cooperación internacional y la implementación de acuerdos para la gestión conjunta y sostenible de recursos hídricos compartidos.

Proyecciones Futuras y Modelos de Adaptación

Escenarios de Escasez Hídrica a Largo Plazo: Los modelos climáticos podrían proyectar escenarios de escasez hídrica a largo plazo en varias regiones, indicando la necesidad de medidas de adaptación y mitigación más agresivas para evitar crisis hídricas futuras.

Innovaciones Tecnológicas: El estudio podría resaltar innovaciones tecnológicas en la gestión del agua, como la desalinización y la reutilización de aguas residuales, que podrían ser clave para enfrentar los desafíos derivados del cambio climático.

Estos resultados esperados proporcionarían una visión integral de cómo el cambio climático está afectando la disponibilidad de recursos hídricos a nivel global y regional. También podrían ser fundamentales para la formulación de políticas de adaptación, la planificación del uso del agua, y la prevención de conflictos relacionados con el acceso y la distribución del agua.

Conclusiones

- El cambio climático está generando una reducción notable en la disponibilidad de agua dulce, especialmente en regiones áridas y semiáridas, debido a la disminución de precipitaciones, el deshielo acelerado de glaciares, y el agotamiento de acuíferos. Además, la calidad del agua se está deteriorando como resultado del aumento de la escorrentía de sedimentos y contaminantes, así como de la intrusión de agua salina en acuíferos costeros. Estos fenómenos, combinados, están poniendo en riesgo el acceso sostenible a recursos hídricos esenciales para la vida humana y la salud de los ecosistemas.
- La disponibilidad limitada de agua está afectando gravemente la productividad agrícola en varias regiones, amenazando la seguridad alimentaria y exacerbando las desigualdades sociales. La reducción en la producción agrícola, junto con los cambios en los patrones de cultivo, está forzando a muchas comunidades a adoptar nuevas prácticas de gestión del agua y a buscar soluciones tecnológicas innovadoras. Sin embargo, estas adaptaciones no siempre son suficientes para compensar los efectos negativos del cambio climático, lo que

subraya la necesidad urgente de intervenciones políticas y apoyo internacional para mitigar estos impactos.

- Las comunidades afectadas están demostrando una notable capacidad de adaptación al desarrollar sistemas más resilientes de gestión del agua, tales como la recolección de agua de lluvia y la adopción de cultivos más resistentes a la sequía. Sin embargo, estas estrategias de adaptación a menudo son reactivas y limitadas en su alcance, lo que puede no ser suficiente para enfrentar los desafíos más severos y prolongados del cambio climático. La capacidad de adaptación también varía significativamente entre regiones, con comunidades más vulnerables enfrentando mayores riesgos y desafíos, lo que resalta la importancia de un enfoque equitativo en las políticas de adaptación y mitigación.
- El cambio climático está exacerbando los conflictos por recursos hídricos, especialmente en cuencas transfronterizas donde la escasez de agua está aumentando las tensiones entre países y comunidades. No obstante, también se observa un fortalecimiento de la cooperación internacional y la creación de acuerdos para la gestión conjunta y sostenible de estos recursos. Estos esfuerzos cooperativos son cruciales para evitar conflictos mayores y garantizar un acceso equitativo y sostenible al agua, demostrando que, aunque el cambio climático presenta serios desafíos, también ofrece oportunidades para reforzar la gobernanza del agua a través de la colaboración internacional.

Referencias

1. Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303-309.
2. Delgado Huertos, E. (2024). Deforestación y desertificación, dos caras del mismo problema. uva.es
3. EPA. (2016). *Climate Change and Water Quality: What You Need to Know*.
4. Guardado Rivera, J. J. & Molina Monroy, N. T. (2023). Evaluación de arsénico en las aguas del lago de Ilopango por la Técnica colorimétrica de tiras reactivas MQUANT® Arsenic Test 1.17917. 0001.. ues.edu.sv
5. Hídricos, R. (2020). *Agua y Cambio climático*. pseau.org

6. Holguin, N., Mugica, A., & Ukar, O. (2021). How is climate change included in the implementation of the European flood directive? Analysis of the methodological approaches of different countries. *Water*. mdpi.com
7. IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
8. Jouravlev, A., Matus, S. S., & Sevilla, M. G. (2021). Reflexiones sobre la gestión del agua en América Latina y el Caribe. Serie Páginas Selectas de la CEPAL. Santiago, Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe. patagonia3mil.com.ar
9. Leguízamo, J. A. C. (2021). Fundamentos técnicos del cultivo del arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) en la región central de Colombia. [HTML]
10. Martínez, A. F. V., Cifuentes, J. A. L., & Gaona, Á. E. A. (2021). Sostenibilidad ambiental y manejo de residuos en sistemas de producción de cacao en el suroccidente de Boyacá-Colombia. *Revista Ciencia y Agricultura*, 18(3), 47-62. uniriioja.es
11. Moser, S. C., & Ekstrom, J. A. (2010). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(2), 731-737.
12. Vega Álvarez, V. J. (2024). Hidrogeología y balance hídrico de la cuenca lacustre de Laguna Rayenantú, ubicada en comuna de Santa Juana, región del Biobío.. udec.cl

© 2024 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).