

Cálculo de la huella de carbono del proceso de potabilización plantas el Pórtico y el Carmen de Tonchalá, empresa Aguas Kpital - E.S.P (Cúcuta), año 2023

Calculation of the carbon footprint of the water treatment process at the el Pórtico and el Carmen de Tonchalá plants, Aguas Kpital company - E.S.P (Cúcuta), year 2023

Recibido: 24 de agosto de 2024

Aprobado: 18 de diciembre de 2024

Cómo citar: L. M. Urbina Polentino, F. A. Carvajal Suárez, and M. L. Pinzón-Bedoya, "Cálculo de la huella de carbono del proceso de potabilización plantas el Pórtico y el Carmen de Tonchalá, empresa de Aguas Kpital - E.S.P (Cúcuta), año 2023", *Mundo FESC*, vol. 15, no. 31, pp. 179–195, Jan. 2025, doi: 10.61799/2216-0388.1769.

Luz María Urbina-Polentino*



Ingeniería Ambiental,
luz.urbina@unipamplona.edu.co,
<https://orcid.org/0009-0009-8562->,
Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

Fidel Antonio Carvajal-Suárez²



Doctor en Educación,
fidelcarvajal@unipamplona.edu.co,
<https://orcid.org/0000-0001-14667500-4899>,
Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

Martha Lucía Pinzón-Bedoya³



Doctora en Ingeniería Química,
mlpinzon@unipamplona.edu.co,
<https://orcid.org/0000-0002-8953-3748>,
Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

*Autor para correspondencia:
mariapolentino114@gmail.com



Cálculo de la huella de carbono del proceso de potabilización plantas el Pórtico y el Carmen de Tonchalá, empresa Aguas Kpital - E.S.P (Cúcuta), año 2023

Resumen

La determinación de la huella de carbono de un proceso productivo permite abordar el impacto ambiental generado, a fin de cumplir la regulación ambiental vigente y tomar acciones al respecto. El presente trabajo, muestra los resultados obtenidos en el cálculo de la huella de carbono del proceso potabilización de la empresa Aguas Kpital E.S.P. (Cúcuta), para el año 2023. La metodología utilizada incluye la evaluación del impacto mediante la determinación del ciclo de vida y la interpretación de este para el proceso seleccionado. Para el cálculo del ciclo de vida se aplicaron de forma combinada la norma ISO 14067, PAS 2050 y GHG Protocol - Estándar de Producto y para el cálculo de la huella de carbono se utilizó el programa OpenLCA 2.1 y la base de datos ecoinvent 3.10. Los valores promedio obtenidos fueron 1.704.473,37 kg CO₂-eq. y 958.698,873 kg CO₂-eq. para la PTAP el Pórtico y el Carmen de Tonchalá, respectivamente.

Palabras clave: Aguas Kpital E.S.P. (Cúcuta), Base de datos ecoinvent 3.10, Huella de Carbono, Norma ISO 14067, PAS 2050.

Calculation of the carbon footprint of the water treatment process at the el Pórtico and el Carmen de Tonchalá plants, Aguas Kpital company - E.S.P (Cúcuta), year 2023

Abstract

The determination of the carbon footprint of a production process makes it possible to address the environmental impact generated in order to comply with current environmental regulations and take action in this regard. This work shows the results obtained in the calculation of the carbon footprint of the water treatment process of the water treatment company Kpital – ESP Cúcuta, for the year 2023. The methodology used includes the evaluation of the impact by determining the of the life cycle assessment and interpreting it for the selected process. For the calculation of the life cycle assessment, the ISO 14067, PAS 2050 and GHG Protocol - Product Standard were applied in a combined way and for the calculation of the carbon footprint the OpenLCA 2.1 program and the ecoinvent 3.10 database were used. The average values obtained were 1,704,473.37 kg CO₂-eq. and 958,698.873 kg CO₂-eq for the el Pórtico and Carmen de Tonchalá plants, respectively.

Keywords: KPITAL Waters - ESP Cúcuta, ecoinvent 3.10 Database, Carbon Footprint, ISO 14067 Standard, PAS 2050.

Introducción

Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), este es un fenómeno complejo que hace referencia a la alteración del clima provocada por actividades humanas, que afecta la composición de los gases en la atmósfera y contribuye a la variabilidad climática [1] y [2].

Los principales Gases de Efecto Invernadero (GEI) son el CO_2 , que se libera en procesos de combustión que hacen uso de combustibles fósiles; el CH_4 , se genera por la actividad ganadera y la descomposición de residuos; el N_2O , se genera en actividades agrícolas e industriales, y los gases fluorados sintéticos, con alto poder de calentamiento global, se generan en algunos procesos industriales [3]. El calentamiento global, causado por la actividad humana, ha generado un aumento de la temperatura media de la atmósfera en aproximadamente $0,8^\circ\text{C}$ desde fines del siglo XIX, con dos tercios de este aumento ocurriendo desde 1980. Este fenómeno se debe principalmente al incremento de las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), especialmente el CO_2 , siendo los principales emisores países como Estados Unidos, China, India y Japón [4]. El aumento de los GEI, debido a actividades humanas, representa un desafío ambiental.

La Huella de Carbono es la cantidad de emisiones de CO_2 -eq. [5] que genera una actividad de manera directa o indirecta, teniendo en cuenta las emisiones de GEI. El análisis de la Huella de Carbono abarca todas las etapas de desarrollo de la actividad, pudiendo emplearse como indicador ambiental global de esta, punto de referencia básico para el inicio de acciones de reducción de consumo de energía y para la certificación y obtención de la etiqueta verde [6].

Medir la Huella de Carbono en el ámbito empresarial y comunitario es complejo debido a la variedad de procesos y variables involucradas. El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una técnica esencial en la gestión ambiental, que evalúa los aspectos ambientales y los posibles impactos de un producto o proceso, a lo largo de su vida útil. Según la norma ISO 14040 [7], el ACV implica la recopilación de datos sobre las entradas y salidas del sistema, la evaluación de sus impactos y la interpretación de estos resultados para cumplir con los objetivos del estudio. Entre las metodologías disponibles, el Panel intergubernamental de cambio climático (IPCC) se destaca por su enfoque en los efectos del cambio climático, lo cual es clave para calcular la Huella de Carbono.

La huella de carbono se calcula mediante la fórmula: *Huella de carbono = Dato Actividad x Factor Emisión (Formula 1)*. El potencial de calentamiento global (PCG o GWP) se utiliza para convertir las emisiones de gases de efecto invernadero en una métrica equivalente al CO_2 , multiplicando las emisiones por sus factores de GWP. Esto permite expresar las emisiones de diferentes gases en "CO₂ equivalente" (CO_2 -eq.), facilitando su comparación y cuantificación. El IPCC actualiza regularmente estos factores para que los gobiernos

determinen sus emisiones (ver Tabla I). [9]

Tabla I Potencial de calentamiento global, escala de tiempo a 100 años

GEI	Vida útil (años)	PCG de 100 años IPCC 2021	Referencia Bibliográfica
Dióxido de carbono (CO ₂)	-----	1	IPCC 2021 – AR6
Metano (CH ₄)	12	27,9	
Óxido nitroso (N ₂ O)	109	273	
HFC-23	228	14600	
HFC-134a	14	1530	
CF4 (PFC)	50000	7380	
Hexafluoruro de azufre (SF ₆)	3200	25200	
Trifluoruro de nitrógeno (NF ₃)	569	17400	

Fuente: [10]

El cálculo de la huella de carbono tiene varios enfoques, uno de ellos es el análisis de una unidad de producción, que consiste en evaluar las emisiones de GEI generadas a lo largo del ciclo de vida de la unidad de producto. Para este trabajo de investigación se seleccionó como unidad para la evaluación de la huella de carbono, las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) de la empresa Aguas Kpital E.S.P. (Cúcuta) [11]. De acuerdo con lo anterior, el propósito de esta investigación fue calcular la Huella de Carbono del proceso de potabilización en las PTAP el Pórtico y el Carmen de Tonchalá de esta empresa de servicios públicos.

Materiales y Métodos

Para calcular la huella de carbono del proceso de potabilización en las PTAP el Pórtico y el Carmen de Tonchalá, operadas por la empresa Aguas Kpital E.S.P. (Cúcuta) durante el año 2023, se implementaron las etapas que se muestran en la Figura 1. La primera etapa consistió en la caracterización del sistema objeto de estudio, la definición de la unidad funcional y del producto, así como el establecimiento de los límites y el alcance del sistema. En la segunda etapa, se llevó a cabo el análisis del ciclo de vida del sistema, mediante la elaboración de un mapa de procesos con el inventario de entradas y salidas, la evaluación del potencial de impactos, la normalización de datos, la selección de factores de emisión y el cálculo del Potencial de Calentamiento Global (GWP). Finalmente, en la tercera etapa se realizaron los cálculos de la huella de carbono del proceso seleccionado, aplicando las metodologías ISO 14067 [12], PAS 2050 [13] y el GHG Protocol-Estándar de Producto [14], con el uso del software OpenLCA y la base de datos ecoinvent 3.10.

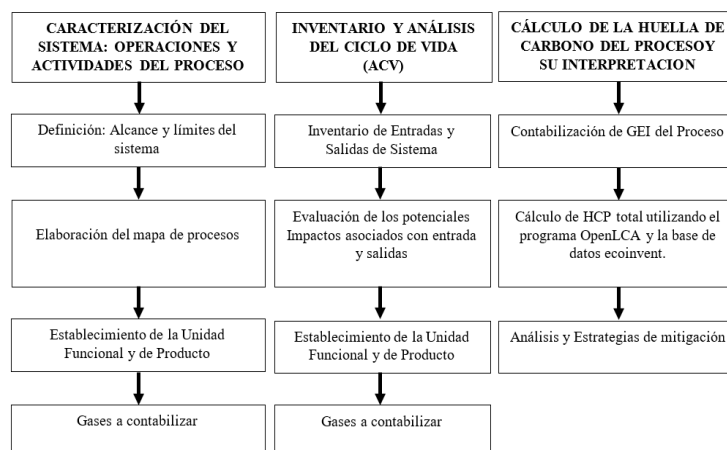


Figura 1: Metodología utilizada para la Evaluación de la Huella de Carbono del proceso de potabilización en consideración.

A continuación, se describen las etapas metodológicas para el desarrollo del presente trabajo, las cuales se esbozaron en la Figura 1.

Caracterización del Sistema: Operaciones y Actividades del Proceso

Alcance del estudio: Este se definió para las PTAP el Pórtico y el Carmen de Tonchalá, conforme a los siguientes de puntos y según la disponibilidad de datos y recursos a analizar.

Límites del sistema: El estudio de las dos PTAP, el Pórtico y el Carmen de Tonchalá, se orientó hacia las emisiones directas asociadas al proceso operativo de potabilización del agua, así como en emisiones indirectas específicas, derivadas del ciclo de vida de los insumos y del consumo energético, calculadas a partir de la base de datos ecoinvent 3.10 [15]. Se aplicó un enfoque “de la cuna a la puerta”, que comprende desde la captación hasta el tratamiento del agua dentro de las PTAP.

Teniendo en cuenta criterios de relevancia, disponibilidad de datos y de tiempo. Se excluyeron: a) distribución: por limitada información; b) uso y disposición final del agua: debido a estar fuera del control operativo de la empresa; c) mantenimiento menor: por su baja contribución a las emisiones de CO₂ frente a los demás procesos productivos y d) desplazamiento del personal: ya son reportadas en la huella organizacional administrativa de la empresa. Estas decisiones ya que son reportadas alineadas con las metodologías de los estándares internacionales ISO 14067 y PAS 2050, que permiten exclusiones razonables, siempre que se justifiquen y se garantice que no afectan la representativamente el estudio.

Elaboración del Mapa de Procesos

A continuación, se presenta un Mapa del proceso de potabilización en las plantas de tratamiento de agua potable desde la captación hasta la producción. (Ver Figura 2).

Procesos de Tratamiento de Agua en las PTAP el Pórtico y el Carmen de Tonchalá



Figura 2: Mapa del proceso de potabilización en las plantas de tratamiento de agua potable.

Ambas PTAP siguen un esquema de tratamiento similar, con adaptaciones en su infraestructura, para garantizar el suministro de agua potable tratada a la población. En cada proceso, se utiliza electricidad para operar los motores y las bombas. En la PTAP el Pórtico, el agua se capta del río Pamplonita y fluye por gravedad a través de un desarenador para eliminar sólidos gruesos, y en la etapa de pretratamiento, se agrega carbón activado. Durante la coagulación, se dosifica Polihidroxiclورو de Aluminio (PAC) y Sulfato de Aluminio tipo B, para facilitar la formación de flóculos, los cuales se agrandan en la floculación con la ayuda de Super Floc 576 C. Estos flóculos se sedimentan, y el agua clarificada se somete a filtración con lechos mixtos para eliminar partículas finas. Posteriormente, se desinfecta con cloro gaseoso para garantizar su calidad microbiológica.

En la PTAP Tonchalá, el agua se capta del río Zulia y pasa por una pila de sello antes de ser mezclada en la estación Tasajero. Luego, se bombea hasta la cámara de quiebre y fluye por gravedad hacia la etapa de coagulación, donde se añaden Sulfato de Aluminio tipo B y Polihidroxiclورو de Aluminio para agrupar impurezas. En la floculación, se utiliza Super Floc 576 C para aumentar el tamaño de los flóculos, que se separan en la sedimentación. El agua clarificada se filtra para eliminar residuos restantes y se desinfecta con cloro gaseoso antes de su distribución.

Continuando con la metodología seleccionada para la realización de este trabajo, se procede con las siguientes descripciones:

Límites geográficos Ubicación y Operación PTAP: Cúcuta, capital de Norte de Santander. Ciudad a 320 metros sobre el nivel del mar. Limita con Tibú al norte, Venezuela al oriente, y los municipios de El Zulia y San Cayetano al occidente. La empresa Aguas Kpital E.S.P. (Cúcuta), con sede en la Avenida 6 #11-2 (edificio San José), es la operadora de las dos

plantas de tratamiento de agua potable; objeto de este trabajo: **PTAP el Pórtico**: Ubicada en la Vereda El Pórtico, Corregimiento de San Pedro, a 4 km al sur del casco urbano de Cúcuta, en la cota 400 msnm, y **PTAP el Carmen de Tonchalá**: Situada en la Vereda San Isidro, municipio de San Cayetano, en la cota 347,70 msnm. [16].

Descripción del producto: El producto estudiado es el agua potable generada por las plantas de tratamiento el Pórtico y el Carmen de Tonchalá.

Unidad funcional: Para este estudio se definió la unidad de 1 metro cubico (m³) de agua potable producida en las PTAP. Esta unidad refleja la función principal del sistema y además permite la comparación con otros sistemas de potabilización del agua, siendo una referencia clara para las entradas y salidas del sistema.

Gases a contabilizar: El estudio se basa en datos de 2023 y se enfoca en las PTAP de Cúcuta, considerando gases como CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, PFCs y HFCs.

Inventario y Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

Caracterización del ciclo de vida del proceso de potabilización: La recolección de datos para el estudio se basó en el año 2023, con información suministrada por la empresa, perteneciente a registros operativos de cada PTAP. Su verificación se realizó mediante: Revisión interna de los reportes mensuales de consumo de energía, uso de insumos químicos y volúmenes de agua tratada. La validación técnica se hizo con el personal responsable en sitio, incluyendo operadores y jefes de producción. Por limitaciones de tiempo y recursos, no se llevó a cabo una revisión por pares externos. Los datos fueron evaluados y ajustados conforme a los estándares metodológicos de la norma ISO 14067 y la PAS 2050.

Los datos fueron normalizados a la unidad funcional, dividiendo cada entrada por el volumen de agua tratada (m³), lo que facilita la comparación y el análisis. Los resultados obtenidos de esta normalización y los datos primarios utilizados para el cálculo de la huella de carbono producto, se muestran en la Tabla II.

Tabla II Inventarios Pórtico 2023 y Carmen de Tonchalá 2023

INVENTARIO FUENTES PRIMARIAS PÓRTICO 2023				INVENTARIO FUENTES PRIMARIAS CARMEN DE TONCHALÁ 2023			
ELEMENTOS /ENTRADAS	Valor	Valor en Unidad Funcional/m3	Unidades	ELEMENTOS/ ENTRADAS	Valor	Valor en Unidad Funcional/m3	Unidades
Agua captada	63.215.140	1,052631561	kg/m ³	Agua - Desarenada	25.298.936	1,052631579	m ³ /m ³
Polihidroxiclورو de Aluminio (kg)	786.818	0,013101758	kg/m ³	Sulfato Aluminio Tipo B	17.389	0,000723517	kg/m ³
Sulfoc 21s (kg)	38.742	0,000645115	kg/m ³	Polihidroxiclورو de Aluminio	440.230	0,018316976	kg/m ³
Polímero Superfloc 576 C (kg)	100	1,67E-01	kg/m ³	Polímero Superfloc 576 C	1.597	6,64E+00	kg/m ³
Cloro Gaseoso (kg)	99.452	0,001656032	kg/m ³	Cloro Gaseoso	21.387	0,000889865	kg/m ³

Carbón Activado (kg)	3.450	5,74E+00	kg/m ³				
Energía Bocatoma (kWh)	8.725	0,000145285	kWh/m ³	Energía Tasajero	11.397.008	0,47420376	kWh/m ³
Energía Desarenadores (kWh)	8.572	0,000142737	kWh/m ³	Energía Cámara Quiebre	4.261	0,00017729	kWh/m ³
Energía PTAP Pórtico (kWh)	414.512	0,006902277	kWh/m ³	Energía PTAP Tonchalá	66.790	0,00277898	kWh/m ³
ELEMENTO/SALIDA				ELEMENTO/SALIDA			
Agua tratada	60.054.384	1	m ³	Agua tratada	24.033.989	1	m ³

Cálculo de la Huella de Carbono del Proceso y su Interpretación

Para realizar el cálculo y análisis de la huella de carbono en OpenLCA, se separaron los datos por procesos, detallando las entradas y salidas según la unidad funcional y utilizando flujos de la base de datos ecoinvent 3.10. En los casos donde un insumo no estaba disponible, se seleccionó uno similar, lo que podría generar variaciones menores en los resultados. Se utilizaron diferentes flujos para reflejar las diferencias entre los proveedores de energía, CELSIA y CENS, adaptando el mix energético de cada uno. En OpenLCA 2.1, se importó ecoinvent 3.10, creando nuevos flujos, procesos y sistemas de producto. Luego, se calcularon los impactos ambientales utilizando metodologías como IPCC 2021 o ReCiPe 2016, donde el programa automáticamente asigna factores de emisión y PCG. Los resultados se compararon y ajustaron según la unidad funcional, permitiendo una visualización clara de los impactos. Este enfoque asegura una evaluación precisa y detallada de la huella de carbono y otros impactos ambientales en función de diferentes escalas.

Resultados y Discusión

Los resultados del análisis de impacto ambiental de las PTAP el Pórtico y el Carmen de Tonchalá para 2023 fueron obtenidos con OpenLCA 2.1 usando la base de datos ecoinvent 3.10. Se crearon procesos específicos para cada PTAP y se evaluaron los impactos ambientales mediante las metodologías IPCC 2021, CML 2016 y ReCiPe 2016 Midpoint, con base en la unidad funcional de 1 m³ de agua tratada. Los principales procesos analizados incluyeron la captación y tratamiento en la PTAP el Pórtico, y el tratamiento y otros procesos en la PTAP el Carmen de Tonchalá.

Estimación de la Huella de Carbono del Proceso de Potabilización y Análisis

Se calculó la huella de carbono de la producción de 63.215.140 m³ de agua tratada, representando la operación real de la PTAP el pórtico en 2023 (Ver figura 3).

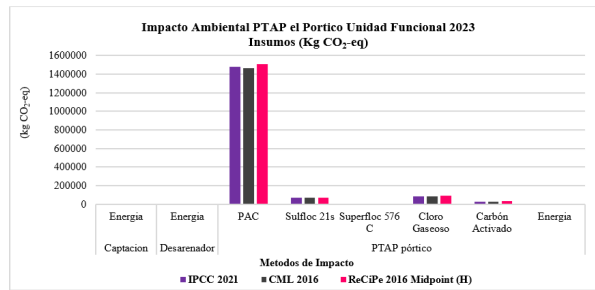


Figura 3: Impacto ambiental PTAP Pórtico insumos producción total 2023

La figura 3 muestra el impacto ambiental de la PTAP el Pórtico para la producción de 63.215.140 m³ de agua potable en 2023, evaluado mediante tres metodologías (IPCC 2021, CML 2016 y ReCiPe 2016). Los procesos de captación y desarenadores, que utilizan energía de CENS (mixta), generaron emisiones de aproximadamente 8.400 kg CO₂-eq, principalmente debido al consumo energético en sitio. El coagulante PAC (Polihidroxiclорuro de Aluminio) tuvo el mayor impacto ambiental con un valor promedio de 1.485.007 kg CO₂-eq. debido a su alto uso en condiciones de agua turbia. Otros insumos como Sulfloc 21s, cloro gaseoso y carbón activado presentaron impactos menores, con emisiones de 73.120 kg CO₂-eq, 89.640 kg CO₂-eq, y 31.092 kg CO₂-eq, respectivamente. El Polímero Superfloc 576 C tuvo el menor impacto, con solo 394,6 kg CO₂-eq. Finalmente, la energía suministrada por CELSIA, mayoritariamente renovable, resultó en 8.520,5 kg CO₂-eq. de emisiones.

Se analizará el impacto ambiental para la producción 24.033.989,2 m³, ya que es una cifra más relevante y significativa para el análisis y representa a escala real de operación de la PTAP el Carmen de Tonchalá para el año 2023 (Ver figura 4).

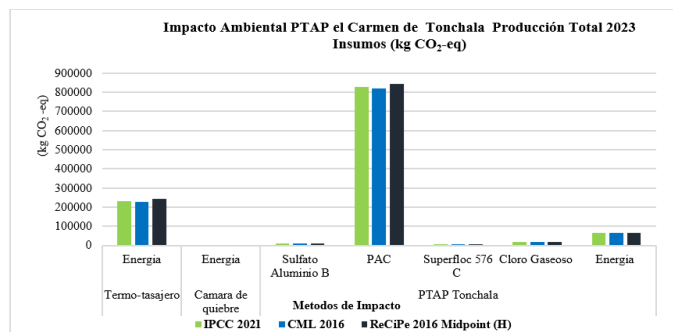


Figura 4: Impacto ambiental PTAP el Carmen de Tonchalá insumos producción total 2023

La figura 4 presenta el impacto ambiental de la PTAP el Carmen de Tonchalá en 2023, evaluado con tres metodologías (IPCC 2021, CML 2016 y ReCiPe 2016). En el proceso de termo-tasajero, el consumo de energía es significativo, con emisiones promedio de 234.271 kg CO₂-eq. aunque el impacto se reduce debido a que la energía proviene de CELSIA, que usa fuentes renovables. En la cámara de quiebre, el impacto es bajo (4.113 kg CO₂-eq.) por el uso mínimo de energía, suministrada por CENS. El coagulante

principal, PAC, es el insumo con mayor impacto, generando 830.872 kg CO₂-eq. debido a la alta turbiedad del agua del río Zulia. Otros insumos, como Sulfato de Aluminio Tipo B, Polímero Superfloc 576 C y Cloro Gaseoso, tienen impactos menores, con 10.320 kg CO₂-eq., 6.212 kg CO₂-eq. y 19.277 kg CO₂-eq. respectivamente. La energía utilizada en el proceso, también suministrada por CENS, genera un impacto de 64.476 kg CO₂-eq. con emisiones directas de 57.860 kg CO₂-eq.

Análisis de impacto ambiental de las PTAP el pórtico y el Carmen de Tonchalá para el año 2023 en la producción de agua total (Ver figura 5)

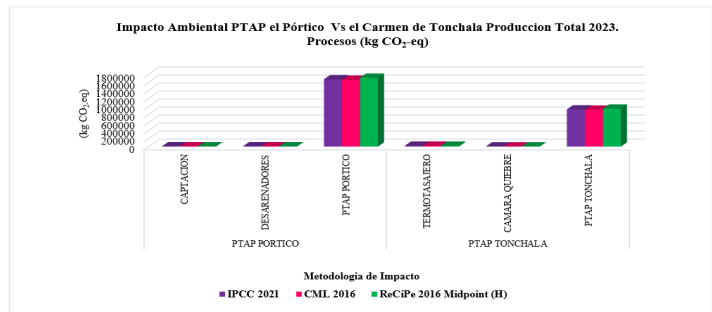


Figura 5: Comparación del impacto ambiental de PTAP Pórtico Vs Carmen de Tonchalá para su producción total 2023

La Figura 5 compara el impacto ambiental total anual de las PTAP Pórtico y el Carmen de Tonchalá, evaluado con tres metodologías (IPCC 2021, CML 2016, ReCiPe 2016). PTAP el Pórtico, que produce 60.054.384 m³ de agua, tiene un impacto mayor con un valor promedio de 1.687.775,6 kg CO₂-eq. debido al uso intensivo de insumos como el PAC. En contraste, PTAP el Carmen de Tonchalá, que produce 24.033.989,2 m³, tiene un impacto de 931.158,5 kg CO₂-eq. comparativamente menor. Los procesos de captación y desarenadores del Pórtico tienen un impacto bajo (8.422,7 y 8.275 kg CO₂-eq.), mientras que el proceso Termotasajero de Carmen de Tonchalá tiene un impacto alto (234.271 kg CO₂-eq.), aunque este se ve reducido en la Cámara de Quiebre (4.113 kg CO₂-eq.).

Análisis de impacto ambiental comparativo de las PTAP el Pórtico y el Carmen de Tonchalá para el año 2023 en función de la unidad funcional para ver la eficiencia. (Ver figura 6).

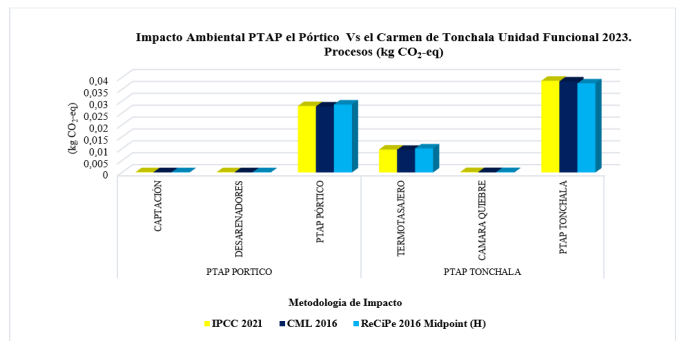


Figura 6: Impacto ambiental PTAP Pórtico vs Tonchalá UF eficiencia

La figura 6 compara el impacto ambiental de las PTAP el Pórtico y el Carmen de Tonchalá por unidad funcional (1 m³ de agua) en 2023, utilizando tres metodologías (IPCC 2021, CML 2016, ReCiPe 2016). En general, PTAP Pórtico tiene un impacto menor y es más eficiente que PTAP el Carmen de Tonchalá en la mayoría de los procesos. Ambos procesos de captación y desarenadores muestran un impacto mínimo similar. Sin embargo, el tratamiento físico-químico en la PTAP el Pórtico tiene un impacto significativamente alto (0,028 kg CO₂-eq.), mientras que el proceso Termotasajero de Tonchalá, por el consumo energético para bombear el agua, tiene un impacto medio-alto (0,0097 kg CO₂-eq.). En la PTAP el Carmen de Tonchalá, el proceso de tratamiento físico-químico es el de mayor impacto (0,0381 kg CO₂-eq.). Esto sugiere que PTAP el Carmen de Tonchalá tiene una eficiencia menor, por lo que se recomienda revisar su proceso para reducir su impacto ambiental.

Huella de Carbono Producida PTAP el Pórtico y el Carmen de Tonchalá

La Tabla III muestra la huella de CO₂-eq. y la producción de agua de las PTAP el Pórtico y el Carmen de Tonchalá en 2023. El Pórtico emitió 1.704.473,37 kg CO₂-eq., para producir 63.215.140 m³ de agua, mientras que el Carmen de Tonchalá emitió 958.698,87 kg CO₂-eq., para 24.033.989,2 m³. La eficiencia relativa del Pórtico fue del 37.09%, y la de el Carmen de Tonchalá del 25.07%. Esto indica que el Pórtico es más eficiente, ya que produce más agua por kg de CO₂-eq. emitido (0,02838 kg CO₂-eq./m³ frente a 0,04804 kg CO₂-eq./m³ en Carmen Tonchalá). Se destaca la necesidad de mejorar la eficiencia operativa, especialmente en Tonchalá, para reducir las emisiones y aumentar la sostenibilidad.

Tabla III Huella de carbono para las PTAP 2023

HUELLA DE CARBONO PARA LAS PTAP				
PTAP	Huella carbono Prom UF kg CO ₂ -eq.	Agua Producida m ³	Huella de Carbono kg CO ₂ -eq.	% Porcentaje eficiencia
PÓRTICO (2023)	0,02838	63.215.140 m ³	1.704.473,37	37,09 %
TONCHALÁ (2023)	0,04804	24.033.989.2 m ³	958.698,873	25,07 %

Los resultados obtenidos muestran que el proceso de potabilización en las PTAP genera una huella de carbono considerable, siendo los principales aportantes el consumo de insumos químicos, especialmente el Policloruro de Aluminio (PAC), y la energía utilizada en cada una de las etapas. Esta información es de gran importancia para la gestión ambiental empresarial, ya que permite identificar puntos críticos y priorizar estrategias de mitigación enfocadas en la eficiencia energética y en la optimización del uso de coagulantes. Desde una perspectiva de política ambiental local, estos resultados ofrecen una base y una guía para fortalecer e incentivar programas de reducción de emisiones a nivel regional y empresarial. Además, la cuantificación de emisiones facilita la toma de decisiones ambientalmente responsables en la empresa mediante planes de inversión en tecnologías limpias, mejoramiento de la eficiencia de los procesos, alternativas tecnológicas en el cambio de los insumos identificados con alta huella de carbono y finalmente, justificar inversiones en conservación y restauración de la fuente hídrica.

Al contrastar con el estudio Determinación de Huella de Carbono para los procesos de potabilización en las plantas El Pórtico y Carmen de Tonchala en la empresa Aguas Kpital Cúcuta S.A ESP [17], se observan diferencias notables en los valores reportados, atribuibles a metodologías y alcances distintos. Sin embargo, al reanalizar los datos de 2017 con la metodología actual, se confirma un aumento del 24.83% en emisiones de CO₂-eq. hacia 2023, ligado al crecimiento en la demanda hídrica. Esto refuerza la necesidad de establecer como política empresarial el cálculo de la huella de carbono año a año, para implementar acciones de mejoramiento continuo.

Por otro lado, un estudio anterior denominado Determinación de la huella de carbono mediante el análisis de ciclo de vida, Caso de Estudio: Edificio Administrativo de una Empresa de Servicios Públicos [18], también en esta empresa, aplicó el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para estimar la huella de carbono del edificio administrativo. En ese caso, las emisiones más relevantes provenían del uso de combustibles fósiles (como ACPM y gasolina) y el consumo eléctrico asociado a las actividades de oficina y a la operación vehicular institucional. Aunque su enfoque fue distinto, centrado en el ámbito administrativo, proporciona un punto de referencia importante. A diferencia de lo anterior, este trabajo se enfoca en el proceso productivo, evaluando el impacto ambiental generado desde la captación hasta el tratamiento del agua, en las PTAP el Pórtico y el Carmen de Tonchalá.

Esta comparación interna permite comprender cómo, dentro de una misma organización, las fuentes de emisión varían notablemente según el tipo de actividad. Mientras en el área administrativa predominan las emisiones indirectas ligadas al consumo energético, en las PTAP el mayor impacto proviene del uso de insumos químicos y del consumo energético operativo. Pese a sus diferencias, ambos estudios coinciden en destacar el ACV como una herramienta esencial para detectar oportunidades de mejora y diseñar estrategias sostenibles a lo largo de los distintos eslabones del sistema.

En un trabajo similar, realizado en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), se realizó un estudio para determinar los impactos ambientales asociados a la potabilización de 1m³ de agua potable en dos plantas de tratamiento ubicadas con captación de fuentes y condiciones geográficas diferentes, además de condiciones de distribución con bombeo y sin bombeo, mediante el uso del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con herramientas diferentes[19], se obtuvieron resultados semejantes a los de este estudio, identificándose como punto crítico del proceso de potabilización, el consumo energético.

De forma análoga, la cuantificación de la huella de carbono establecida por GHG Protocol [20], fue propuesta como una estrategia corporativa sostenible empresarial, para el sector de servicios públicos en Colombia, específicamente en el sector eléctrico, ya que este tipo de empresas se encuentran comprometidas con el mejoramiento de la gestión ambiental. Todo ello con el fin de cumplir con todos los estándares de

reconocimiento internacional y compromisos nacionales, para poder sugerir mejoras en los procedimientos de sus operaciones y alcanzar las metas propuestas, teniendo como meta el punto de equilibrio en las emisiones con base al CO₂-eq.o carbono neutral y la descarbonización para el año 2050.

Estrategias de mitigación

Los plazos para realizar las estrategias técnicas de mitigación propuestas para disminuir la huella de carbono en el proceso de tratamiento de las PTAP Pórtico y Carmen de Tonchalá, se resumen a continuación en la Tabla IV.

Tabla IV Estrategias de mitigación

PLAZO	Energía	Etapa de coagulación	Proceso físico-químico de tratamiento
• Corto	• Identificar puntos críticos de consumo.	• Establecer listado de coagulantes naturales, su disponibilidad y costo.	• Implementar sistemas de recirculación y reutilización del agua de lavado de filtros y tanques.
• Mediano	• Implementar el uso de combustibles alternativos con menores factores de emisión.	• Proponer un diseño experimental para uso coagulantes naturales y/o biodegradables comparado con el coagulante tradicional.	• Determinar viabilidad para el uso de membranas o nanofiltración para disminuir la carga de sólidos suspendidos.
• Largo	• Automatizar las operaciones unitarias mediante la instalación de sensores.	• Implementar uso coagulante y/o mezclas de coagulante de acuerdo con resultados de la etapa mediano plazo.	• Desarrollar reingeniería para el tratamiento: a) Establecer objetivos; b) Rediseñar el proceso incluyendo innovaciones tecnológicas; c) Implementar los cambios y d) Evaluar los resultados.

Además de las acciones planteadas a corto, mediano y largo plazo, se considera clave fomentar la investigación y la innovación en el proceso de potabilización. Para ello, se propone crear un departamento de Investigación y Desarrollo (I&D), al igual que establecer alianzas con instituciones de educación superior (IES) de la región. Esto permitiría explorar nuevas tecnologías, evaluar su aplicabilidad en contextos reales y avanzar hacia soluciones más eficientes y sostenibles. Invertir en conocimiento es también una forma de cuidar el agua, mejorar los procesos y reducir el impacto ambiental de manera responsable.

Conclusiones

- La etapa que mayor impacto ambiental generada en las PTAP de tratamiento El Pórtico y El Carmen de Tonchalá de la empresa Aguas Kpital E.S.P. (Cúcuta) en el año 2023, es la etapa de coagulación, por el uso de policloruro de aluminio (PAC) y en general, el consumo de energía, lo cual se debe a la alta turbidez del agua captada, requiriendo mayor uso de coagulantes y equipos.

- Los valores de la huella de carbono registrados para el año 2023, en la PTAP el Pórtico fue de 1.704.473,37 kg CO₂-eq. y el Carmen de Tonchalá fue de 958.698,87 kg CO₂-eq., debido al aumento en la producción de agua e insumos. A partir de los valores registrados para este año, esta actividad formara parte del plan de manejo ambiental, en lo que

corresponde al programa de gestión de la huella de carbono, tomando como línea base el año 2023 para futuras mediciones.

- El uso de herramientas como OpenLCA y ecoinvent, agiliza el cálculo de la huella de carbono, promoviendo una gestión más eficiente.
- La eficiencia relativa, teniendo en cuenta la unidad funcional, en la PTAP el Pórtico fue de 37,09%, valor superior a la del Carmen de Tonchalá que fue 25,07%, lo que indica la necesidad de optimizar los procesos en esta última. A pesar de ello, es necesario mejorar la eficiencia operativa en ambas PTAP, para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).
- La realización de este trabajo de investigación, indica que Aguas Kpital E.S.P. (Cúcuta) está comprometida con la responsabilidad social empresarial, incorporado la sostenibilidad ambiental de sus procesos, mediante el análisis de huella de carbono en ambas PTAP.

Recomendaciones

- Realizar un análisis detallado del proceso de tratamiento de agua para identificar puntos críticos de emisiones, registrando el consumo energético de cada proceso y evaluando la reutilización de lodos.
- Dar continuidad al monitoreo anual para el cálculo de la huella de carbono año a año, considerando la distribución del agua y los parámetros fisicoquímicos, y adquirir la versión corporativa de la base de datos ecoinvent, utilizando como línea base los resultados obtenidos en esta investigación (Año 2023).
- Implementar un plan de monitoreo y mejora continua de las emisiones de GEI, y realizar un análisis comparativo del uso de coagulantes naturales y/o biodegradables versus coagulante tradicional (PAC), utilizando OpenLCA y ecoinvent para determinar cuál es más eficiente, teniendo en cuenta costo disponibilidad y reducción de emisiones.
- Mejorar la eficiencia de la PTAP Carmen de Tonchalá, para lo que se sugiere: a) Rediseñar el proceso incluyendo innovaciones tecnológicas; b) Implementar los cambios y c). Evaluar los resultados de las emisiones por m³ de agua tratada en cuanto a la huella de carbono.

Referencias

- [1] J. E. Pinto Hernández y M. Salazar de Cardona, "Cambio climático y vulnerabilidad: perspectivas para la región nororiental de Colombia - Santanderes," *BISTUA: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, vol. 12, no. 1, pp. 16–45, 2014.

- [2] IDEAM, *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero: Tercer Informe Bienal de Actualización de Colombia ante la CMNUCC*. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2021.
- [3] K. Marvel, W. Su, R. Delgado, S. Aarons, A. Chatterjee, M. E. Garcia, Z. Hausfather, K. Hayhoe, D. A. Hence, E. B. Jewett, A. Robel, D. Singh, A. Tripathi, and R. S. Vose, "Ch. 2. Climate trends," in *Fifth National Climate Assessment*, A. R. Crimmins, C. W. Avery, D. R. Easterling, K. E. Kunkel, B. C. Stewart, and T. K. Maycock, Eds. Washington, DC, USA: U.S. Global Change Research Program, 2023.
- [4] L. M. G. Contreras, "Evolución de la política de cambio climático en Colombia," *Vniversitas*, vol. 69, pp. 1-17, 2020. doi: <https://doi.org/10.11144/Javeriana.vj69.epcc>
- [5] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "Inventario de Gases de Efecto Invernadero - GEI," Bogotá, Colombia, Marzo 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/inventario-de-gases-de-efecto-invernadero-gei/#tabs-1>
- [6] C. M. Lubo Cetina, L. M. Rodríguez Pérez, A. P. Jiménez Escobar y A. López Astudillo, *Huella de carbono - Dinámica de sistemas - Calidad*, Cali, Colombia: Editorial Universidad Icesi, 2019.
- [7] P. Granda, "ISO 14040 como marco de referencia del Análisis del Ciclo de Vida," *Envira*, Febrero 2024. [En línea]. Disponible en: <https://envira.es/es/iso-14040-principios-relacionados-gestion-ambiental/>
- [8] C. Espíndola y J. O. Valderrama, "Huella del carbono. Parte 1: conceptos, métodos de estimación y complejidades metodológicas," *Información Tecnológica*, vol. 23, no. 1, pp. 163-176, ene. 2012. doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000100017>
- [9] Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA), "Understanding Global Warming Potentials," 4 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- [10] Our World in Data, "Global warming potential of greenhouse gases relative to CO₂," 6 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ourworldindata.org/grapher/global-warming-potential-of-greenhouse-gases-over-100-year-timescale-gwp>
- [11] ICONTEC, *NTC-ISO 14040:2022 - Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia*, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá, NTC-ISO 14040:2022, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-iso-gestion-ambiental-analisis-de-ciclo-de-vida-principios-y-marco-de-referencia-ntc-iso14040-2022.html>

- [12] International Organization for Standardization, *ISO 14067:2018 – Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/71206.html>
- [13] British Standards Institution, *PAS 2050:2011 – Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://knowledge.bsigroup.com/products/specification-for-the-assessment-of-the-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-goods-and-services>
- [14] World Resources Institute y World Business Council for Sustainable Development, *Greenhouse Gas Protocol: Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*, 2011. [En línea]. Disponible en: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Product-Life-Cycle-Accounting-Reporting-Standard_041613.pdf
- [15] ecoinvent, *ecoinvent v3.10 – Data with purpose*, 28 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ecoinvent.org/ecoinvent-v3-10/>
- [16] Aguas Kpital Cúcuta S.A. E.S.P., “Planta de tratamiento | Aguas Kpital Cúcuta S.A. E.S.P.,” 2017. [En línea]. Disponible en: <https://akc.com.co/web/plantas-de-tratamiento/>
- [17] A. Díaz, “Determinación de Huella de Carbono para los procesos de potabilización en las plantas El Pórtico y Carmen de Tonchalá en la empresa Aguas Kpital Cúcuta S.A. E.S.P.,” Trabajo de grado, Univ. de Pamplona, 2018. [En línea]. Disponible en: http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/8430/1/Diaz_2019_TG.pdf
- [18] A. M. Verdugo Rojas, H. U. Rivera Alarcón, y E. G. Flórez Serrano, “Determinación de la huella de carbono mediante el análisis de ciclo de vida, Caso de Estudio: Edificio Administrativo de una Empresa de Servicios Públicos,” *Mundo FESC*, vol. 13, no. S2, pp. 23–37, 2023. doi: <https://doi.org/10.61799/2216-0388.1653>
- [19] M. L. Barrera Pérez, O. A. Ávila, y L. Beleño Montagut, “Estimación del potencial de calentamiento global en un sistema de potabilización de un acueducto municipal en Colombia,” *BISTUA Rev. Fac. Cienc. Básicas*, vol. 18, no. 1, pp. 11–16, nov. 2020. doi: <https://doi.org/10.24054/bistua.v18i1.206>
- [20] P. T. Otálora Torres, “Elaboración del procedimiento para el cálculo de la huella de carbono empresarial de Enel Colombia,” trabajo de grado, Univ. El Bosque, Bogotá, Colombia, 2022.