

DATOS ESTUDIANTE

Nombre completo: Carlos Enrique Yama Jojoa

Identificación: C.C N° 1.085.347.831 de Pasto (Nariño)

Dirección: Carrera 112 #48-92 Conjunto Residencial Pino K112
Apto 1003 Torre 4

Ciudad: Cali – Valle del Cauca

Teléfonos de contacto: Celular 319 383 79 39

Correo Electrónico: carlosE1799@hotmail.com

Profesión: Ingeniero Civil
Residente de Supervision técnica
Ker Ingenieria BIC

Pregrado: Pontificia Universidad Javeriana Cali

Posgrado: Pontificia Universidad Javeriana Cali
Maestría en Gerencia de Construcción



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL, ECONÓMICO Y EN LA SALUD
HUMANA DEL MORTERO CON NANOPARTÍCULAS DE TiO_2 PARA LA
PURIFICACIÓN DEL AIRE Y/O AUTOLIMPIEZA**

Programa de Maestría en Ingeniería Civil
Énfasis en Gerencia de Construcciones

Presentado por:

CARLOS ENRIQUE YAMA JOJOA

Dirección:

ANÍBAL CÉSAR MAURY RAMÍREZ

Codirección:

DANIELA MARTÍNEZ LÓPEZ

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Julio de 2024

AGRADECIMIENTOS

La culminación de esta tesis no habría sido posible sin el respaldo y la colaboración de muchas personas a las que me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento.

En primer lugar, quiero agradecer a mi director de tesis, el Dr. Aníbal Maury Ramírez, por su invaluable guía, paciencia y dedicación. Asimismo, a mi codirectora Daniela Martínez López, quienes depositaron su confianza en mis capacidades impulsándome a superar mis límites.

A mis profesores y compañeros del programa de maestría, gracias por el constante acompañamiento y las palabras de aliento. Particularmente, al ingeniero Manuel Alejandro Rojas, quien fue clave al momento de tomar la decisión de iniciar este nuevo reto y quien me dio todo su apoyo para ingresar cuando mis ideas estaban nubladas. Por otra parte, al ingeniero Héctor Mauricio Benavides, quien me motivó a lo largo de esta etapa, reconociendo mis esfuerzos al momento de presentar este proyecto y al darme consejo e impulsarme cuando no estaba en la mejor de las situaciones. Cada interacción ha contribuido a mi crecimiento académico y personal.

A mi familia, en primer lugar, a mi madre, Myrian Jojoa Salazar, quien es la principal responsable de estar presentando este trabajo de grado, gracias por su constante apoyo, por levantarme la moral cuando lo necesitaba y por siempre estar al lado mío ayudando sin ni siquiera pedírselo y por ser incondicional conmigo. A mi padre, Carlos Enrique Yama, gracias por escucharme, por sus consejos y su respaldo en todo sentido. Finalmente, a mi hermana, mi abuela y mi tía, ustedes en igual medida me han brindado esa energía y esas palabras de aliento que necesitaba, son quienes han estado de cerca viendo mi progreso e impulsándome para seguir adelante y superarme en todo momento. Sus sacrificios y creencias en mis sueños me han dado la fuerza para perseverar en los momentos más difíciles.

Finalmente quiero agradecer a la Pontificia Universidad Javeriana, por proporcionarme los recursos y el ambiente necesarios para llevar a cabo es proyecto. Su apoyo ha sido esencial para la realización de este trabajo.

Con gratitud,

Carlos Enrique Yama Jojoa.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	4
1.1	Planteamiento del problema.....	6
1.2	Pregunta de investigación	7
1.3	Alcance del trabajo de grado.....	8
1.4	Objetivos del proyecto	11
1.4.1	Objetivo general.....	11
1.4.2	Objetivos específicos	11
1.5	Justificación	12
2	MARCO DE REFERENCIA	13
2.1	Revisión Bibliográfica	13
2.1.1	La nanotecnología y la construcción.....	13
2.2	Fundamentos del TiO ₂	14
2.2.1	Tamaño y estructura cristalina.....	14
2.2.2	Propiedades ópticas.....	14
2.2.3	Propiedades fotocatalíticas.....	14
2.2.4	Estabilidad química.....	15
2.2.5	Superficie y reactividad	15
2.3	Las nanopartículas y sus aplicaciones en el concreto y mortero.	15
2.4	Fotocatálisis del TiO ₂	18
2.5	Efectos sobre la salud humana.....	19
2.5.1	Contaminantes atmosféricos	20
2.5.2	Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	20
2.5.3	Óxidos de Azufre (SO _x)	21

2.5.4	Monóxido de Carbono (CO)	21
2.6	Análisis del Ciclo de Vida (ACV)	22
2.7	Análisis de Costos en el Ciclo de Vida (LCC)	23
2.8	Impacto en la salud humana mediante la metodología ReCiPe	24
3	METODOLOGÍA	25
3.1	Análisis del ciclo de vida	26
3.2	Estimación del impacto en la salud humana (ReCiPe)	29
3.3	Análisis de costos en el ciclo de vida (LCC)	34
4	RESULTADOS	36
4.1	Análisis del Impacto ambiental utilizando OpenConcrete	36
4.1.1	Resultados de modelación	39
4.2	Impactos a la salud humana utilizando RECIPE	47
4.3	Análisis de Costos en el Ciclo de Vida (ACC)	52
4.3.1	83Valoración costos de construcción actualización de precios 2024	52
4.3.2	Valorización de los costos de mantenimiento	53
4.3.3	Valoración de las emisiones reducidas por el mercado de carbono	59
5	CONCLUSIONES	61
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
7	ANEXOS	70

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Vista general del Túnel de la Avenida Colombia</i> (Rosero Berrío, 2023).	9
Figura 2 Vista interna del Túnel de la Avenida Colombia (Rosero Berrío, 2023).	10
Figura 3 Perfil esquemático del túnel mundialista.	10
Figura 4 Sección esquemática del túnel mundialista.	10
Figura 5 Proceso de fotocatalisis nanopartículas TiO ₂ (Medina et al., 2016).	19
Figura 6 Metodología de trabajo para evaluación del impacto ambiental, en salud humana y económica del mortero con nanopartículas de TiO ₂	26
Figura 7 Metodología RECIPE modificado de RIVM, (2017).	30
Figura 8 Ubicación geográfica de planta de concretos premezclados tomado de Google Maps.	38

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación (1).....	48
Ecuación (2).....	55
Ecuación (3).....	55

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Categorías de punto medio e indicadores de impacto modificado de RIVM, (2017).	31
Tabla 2 Factores de caracterización específicos de cada país. Modificado de RIVM, (2017)	33
Tabla 3 Datos de entrada modelación para la fabricación del mortero. Modificado de OpenConcrete versión 2010.....	36
Tabla 4 Datos de entrada para mezcla de combustible para horno de cemento. Modificado de OpenConcrete versión 2010.....	37
Tabla 5 Datos de entrada para la eficiencia del horno. Modificado de OpenConcrete versión 2010.....	37
Tabla 6 Distancias de los insumos a la planta de concretos premezclados.	39
Tabla 7 Emisiones del mortero estándar. Datos de salida modificados de OpenConcrete versión 2010.....	40
Tabla 8 Emisiones de las nanopartículas TiO ₂ . Datos de salida modificados de OpenConcrete versión 2010.....	40
Tabla 9 Emisiones para 1 m ³ de mortero con adición de 5% de nanopartículas de TiO ₂ . Datos de salida modificados de OpenConcrete versión 2010.	40
Tabla 10 Dimensiones del Túnel de la Avenida Colombia.	41
Tabla 11 Emisiones de gases NO _x (Medina et al., 2016).....	41
Tabla 12 Emisiones de gases SO _x (Medina et al., 2016).....	41
Tabla 13 Emisiones de gases CO (Medina et al., 2016).	41
Tabla 14 Emisiones y Reducciones de los gases generados por el uso del túnel basado en los parámetros de investigación de Medina et al., (2016).	42
Tabla 15 Tiempo de análisis para las emisiones.	42

Tabla 16 Niveles máximos de exposición a contaminantes atmosféricos Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).....	42
Tabla 17 Emisiones de gases vs Límites permitidos para la salud humana.....	43
Tabla 18 Emisiones totales durante la vida útil estimada del mortero en el Túnel (50 años).	46
Tabla 19 Compatibilidad OpenConcrete y RECIPE (Manual de la metodología RIVM, 2017).	47
Tabla 20 Resumen de emisiones de mortero, datos de salida OpenConcrete 2010.....	48
Tabla 21 Factor de punto medio a punto final modificado de (Manual de la metodología RIVM, 2017).....	49
Tabla 22 Estimación de DAYLY mortero estándar, datos de salida RECIPE.	50
Tabla 23 Estimación DALY Mortero + 5% de TiO ₂ . Datos de salida de RECIPE	50
Tabla 24 Años de vida compensados por emisiones de gases NO _x . Datos de salida de RECIPE.....	51
Tabla 25 Potencial de recuperación de la salud humana con la utilización del mortero con TiO ₂	51
Tabla 26 Presupuesto actualizado de implementación nanopartículas de TiO ₂ 2024. Actualizado de Medina et al., (2016).....	53
Tabla 27 Estimación de Costos de Alquiler Hidrolavadora Industrial de Alta Presión Kärcher HDS 6/14 C.....	54
Tabla 28 Rendimiento del equipo de hidrolavado.	56
Tabla 29 APU Mantenimiento de la superficie por medios manuales.....	56
Tabla 30 Costos de implementación de mortero con nanopartículas de TiO ₂ en el túnel mundialista.....	58
Tabla 31 Presupuesto con AIU de la implementación de mortero con nanopartículas de TiO ₂	58

Tabla 32 Transformación de las emisiones reducidas por las nanopartículas de TiO₂ a CO₂
Eq..... 59

INDICE DE ANEXOS

Anexo A Modelación del impacto de mortero con nanopartículas de TiO₂..... 70

Anexo B Análisis de precios unitarios APU 78

RESUMEN

En este trabajo se llevó a cabo una evaluación del impacto del mortero con nanopartículas de dióxido de titanio TiO_2 en tres áreas fundamentales: ambiental, salud humana y económica, con el objetivo de determinar su viabilidad y efectos. Se analizó su impacto durante la instalación y su desempeño a lo largo de 50 años, utilizando como caso de estudio el túnel de la avenida Colombia en Cali.

Para estimar las emisiones, se realizó una revisión exhaustiva de la literatura para modelar el comportamiento del nanomaterial. Además, se utilizaron datos del estudio de grado previo como insumo para el análisis a largo plazo del túnel. El impacto en la salud humana se evaluó mediante la metodología RECIPE, considerando los años de vida perdidos por enfermedad o discapacidad.

Los resultados muestran beneficios significativos del mortero con nanopartículas de TiO_2 . Un aumento en la concentración podría mejorar aún más la reducción de emisiones y ampliar los beneficios para la salud humana y el ambiente, justificando así la inversión necesaria.

ABSTRACT

This study conducted an assessment of the impact of titanium dioxide nanoparticles (TiO₂) mortar across three critical domains: environmental, human health, and economic, aiming to determine its feasibility and effects. The study analyzed its impact during installation and its performance over 50 years, focusing on the case study of the Colombia Avenue tunnel in Cali.

A comprehensive literature review was conducted to estimate emissions and model the behavior of the nanomaterial. Additionally, data from the preceding thesis study were used to analyze the long-term behavior of the tunnel. Human health impacts were evaluated using the RECIPE methodology, considering years of life lost due to illness or disability.

Results indicate significant benefits of TiO₂ nanoparticle mortar. Increased concentrations could further enhance emission reduction and extend benefits to human health and the environment, thereby justifying the necessary investment.

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad el mundo atraviesa una gran crisis medioambiental, situación que se ve reflejada en los efectos del cambio climático, degradando los recursos y desbalanceado el equilibrio del planeta a niveles preocupantes; es muy común en esta época hablar del llamado “no retorno” ya que diversas personas que estudian estos fenómenos tienen claro que estamos al borde de acabar con la vida como la conocemos por lo tanto el desarrollo sostenible se ha convertido en una alternativa robusta para balancear los impactos ambientales, de salud humana y económicos causados por el hombre, el campo de la ingeniería y particularmente el sector de la construcción tienen una gran responsabilidad en la situación mencionada ya que aquí está el potencial de la construcción sostenible y la aplicación de nuevas tecnologías para dar paso al crecimiento responsable y mas aun cuando se tiene el compromiso a 2025 de llegar a las 0 emisiones.

. Por lo anterior, la evaluación del impacto ambiental, salud humana y económico de nuevas tecnologías y materiales es de suma importancia para el sector de la construcción. En este proyecto de grado se analiza la utilización de las nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) en la producción de mortero, con el objetivo de evaluar la viabilidad de su uso y aprovechar sus propiedades auto limpiantes y de purificación del aire.

El mortero con nanopartículas de TiO_2 despierta gran interés debido a su capacidad para reducir simultáneamente las actividades de mantenimiento y mejorar la calidad del aire en los entornos urbanos. Estas nanopartículas actúan como catalizadores y oxidantes en reacciones químicas cuando se exponen a la luz solar o luces artificiales equivalentes, lo que permite descomponer contaminantes orgánicos e inorgánicos, eliminando así sustancias nocivas al material y al ambiente.

Sin embargo, para determinar los beneficios efectivos de las nanopartículas de TiO_2 , es esencial realizar una evaluación cuantitativa de los impactos en los tres ejes mencionados, ambiental, salud humana y económico, a lo largo de todo el ciclo de vida de un proyecto de construcción relacionado con la implementación de este tipo de tecnología. Por lo anterior, utilizando un estudio de caso, en este proyecto se evalúa el impacto ambiental para determinar cómo la producción y el uso de este tipo de mortero afectan al medio ambiente, incluyendo la calidad del aire, el consumo de recursos naturales y la generación de residuos. De igual forma en la evaluación del impacto económico se analizan los costos de construcción y mantenimiento de

estos materiales. Además, en este proyecto se incluyen los impactos en la salud humana derivados de las potenciales afectaciones ambientales de los morteros con TiO_2 .

En resumen, la evaluación del impacto ambiental, en salud humana y económico del mortero con adición de nanopartículas de TiO_2 es esencial para comprender los beneficios y posibles desafíos asociados con esta innovadora tecnología. Esta evaluación permitirá tomar decisiones informadas sobre su implementación y promover el desarrollo sostenible en el campo de la construcción.

1.1 Planteamiento del problema

En los últimos años los nanomateriales se han convertido en un tema muy atractivo para la industria de la construcción a nivel mundial. Esto principalmente debido a que, aprovechando las novedosas propiedades de su escala nanoscópica, estos materiales permiten el desarrollo de materiales de construcción más resistentes, durables y con diversas funciones que responden automáticamente a condiciones del entorno. En particular, el uso de nanopartículas en el concreto y el mortero ha permitido una sustancial mejora en las propiedades en estado fresco (*e.g. manejabilidad*) y endurecido (resistencia mecánica y durabilidad). Además, por ejemplo, el uso de nanopartículas de dióxido de titanio ha permitido el desarrollo de funciones autónomas en el concreto y mortero tales como la autolimpieza y purificación del aire (Castro-Hoyos et al., 2022).

El TiO_2 en escala nanoscópica utilizado en los materiales a base de cemento ha permitido la degradación de un determinado rango de compuestos orgánicos (COVs) e inorgánicos (NO_x y SO_2), los cuales son al mismo tiempo agresivos tanto para las propiedades del material como para el medio ambiente. Esto porque cuando el dióxido de titanio es expuesto a luz que contiene rayos UV-A (315-400 nm), propiedades de purificación del aire, propiedades auto limpiantes y propiedades antimicrobianas se pueden generar espontánea y simultáneamente en la superficie del material que lo contiene. Esto es debido a que el dióxido de titanio es un material fotocatalítico que tiene una estructura electrónica compuesta por dos bandas, la banda de valencia (llena de electrones) y la banda de conducción (sin electrones). La diferencia energética entre la banda de conducción y la banda de valencia es la llamada banda prohibida, cuando un fotón con una energía superior a ésta entra en contacto directo con este material, un electrón (e^-) de la banda de valencia se mueve hacia la banda de conducción, dejando así un hueco electrónico (h^+). Una porción del par foto-excitado hueco-electrón se difunde hacia la superficie del material fotocatalítico, lugar donde es retenido para participar en reacciones químicas con moléculas de oxígeno y agua presentes en el medio ambiente. Los huecos electrónicos (h^+) pueden reaccionar con moléculas adsorbidas como las de agua para producir los radicales hidroxilos que son moléculas altamente reactivas y que se descomponen rápidamente. Actuando como receptor de electrones, el oxígeno presente en el aire puede reaccionar con los electrones para formar los aniones radicales superoxidantes (O_2^-). Los radicales hidroxilos (oxidantes) y los aniones radicales superoxidantes (reductores) generados sobre la superficie del TiO_2 han demostrado una gran capacidad para

degradar diferentes tipos de microorganismos, casi todos los tipos de contaminantes orgánicos y otros compuestos inorgánicos tales como NO_x y SO_2 (Castro-Hoyos et al., 2022)(Maury & de Belie, 2010).

Sin embargo, a pesar de los resultados obtenidos con las nanopartículas de TiO_2 en el mortero, el uso de estos nanomateriales no se ha extendido masivamente en edificaciones e infraestructura urbana debido, entre otros, a sus elevados costos. Por lo anterior, este proyecto busca evaluar los impactos económicos, ambientales del mortero con nanopartículas de TiO_2 utilizando la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), ampliamente conocida porque que permite consolidar, comparar y evaluar impactos de sostenibilidad a través de indicadores ambientales, económicos y sociales (Mesa et al., 2021).

Desde el punto de vista económico, la industria de la construcción se vio fuertemente afectada por los precios de los materiales, lo anterior es especialmente importante considerando que el país apenas se encuentra superando el pico máximo que se obtuvo durante el anterior año, no obstante sigue siendo un tema de preocupación ya que si bien las estrategias gubernamentales han logrado bajarla la misma aún se mantiene en un 7.2% igualando la cifra del mes anterior del presente año (Expansión / Datosmacro, 2024) continúan las problemáticas de desempleo y las empresas atraviesan por una fuerte crisis económica, por ello el analizar este tipo de inversiones es supremamente importante ya que se debe evitar al máximo el desperdicio de dinero en nuevas técnicas que no sean verdaderamente eficientes por ello se requiere estudiar la producción de nanopartículas; de entrada se sabe que es un proceso más sencillo y con posibilidades de compensar su impacto a diferencia de la producción de cemento Portland la cual produce más emisiones que las nanopartículas (UNAL, 2021). Una mejora de este tipo en el sector económico puede traer consigo un nuevo mercado generando nuevos puestos de trabajo, con mejor salario y condiciones laborales generados por el sector construcción. Se conoce que hasta el año 2022 se tienen cerca de 67.000 a 75.800 profesionales activos y durante los últimos 3 años se ha contribuido, como mínimo, con el 6.84% del empleo nacional (Semana, 2023).

1.2 Pregunta de investigación

De acuerdo con lo anterior, en este proyecto se le pretende dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el impacto ambiental, económico y en la salud humana del uso de nanopartículas de TiO_2 en el mortero para la purificación del aire y/o autolimpieza?

1.3 Alcance del trabajo de grado

La evaluación del impacto ambiental, económico y en salud humana del mortero con nanopartículas de TiO_2 para la purificación del aire y/o autolimpieza se desarrolló mediante el estudio de caso para la potencial implementación del material en el Túnel de la Avenida Colombia, el cual se encuentra localizado en el centro de Santiago de Cali. La construcción de este túnel inicio el 11 de enero del 2011 y con una duración de 28 meses la obra seria inaugurada el 13 de mayo del año 2013, su inversión fue superior a los 39.000 millones de pesos colombianos esta obra permitió el mejoramiento del flujo vehicular, ampliación de las redes de acueducto, energía, alcantarillado y estuvo relacionado con el proyecto del sistema de transporte masivo MIO logrando proporcionar carriles independientes. La obra aprovecho la depresión de la calzada entre las calles 6 y 13; en esta área se utilizó concreto lanzado. En la entrada se forma una rampa con material granular y para la salida se emplea una mezcla asfáltica. Se tuvieron en cuenta obras adicionales como la instalación de una tubería de acueducto entre las calles 5-14 y 5-13 (Sánchez, 2013). Esta estructura logra permitir altos volúmenes de tránsito diario, pero a su vez expuesto a altos niveles de contaminación atmosférica generada por la combustión de combustibles fósiles de los vehículos y algunas industrias cercanas. De acuerdo con (Medina et al., 2016), el Túnel es un proyecto con un área de 48000 m^2 y una longitud total de 833 m y 670 m de soterramiento. La vía que contiene el Túnel se compone de cuatro carriles de 3 m de ancho sin berma en la Figura 3 y Figura 4 se encuentran cortes esquemáticos con las características del túnel. Esta obra cuenta con sistemas de ventilación y exclusas que permiten el escape de los gases que generan los vehículos a su paso. El Túnel, también conocido popularmente como hundimiento, cuenta con rejillas de ventilación en la parte superior, barreras acústicas con el fin de disminuir el ruido, y cinco salidas de emergencia dispuestas al costado izquierdo que salen a la superficie a la altura de las calles 6, 8, 9, 10 y 11. Mediante el estudio de caso se validaron los resultados obtenidos y la metodología utilizada para su posterior aplicación a otro tipo infraestructura urbana o edificaciones que consideren utilizar mortero con nanopartículas de TiO_2 para la purificación del aire y/o autolimpieza. Más detalles sobre el Túnel de la Avenida Colombia pueden observarse en la Figura 1 y Figura 2.

El estudio de caso tomo como insumo la información del estudio del dicho túnel para realizar el análisis del ciclo de vida, con esta información se pueden obtener resultados de emisiones en las etapas de la cuna a la puerta ya que se tomaron las mediciones en sitio; este factor y el uso del software OpenConcrete determinara las limitaciones del estudio ya que el análisis se llevara hasta la etapa de mantenimiento, no se contemplan las etapas de demolición ya que el software tiene esta limitante, para el análisis de impacto en salud humana se usa como insumo los resultados de emisión del ACV. Este proyecto de grado presenta una aproximación académica a los impactos ambientales, económicos y en salud humana derivados de la producción, transporte y mantenimiento del mortero con nanopartículas de TiO_2 para el caso de estudio. Por lo anterior, los resultados obtenidos no pretenden reemplazar los potenciales resultados de un ACV con un alcance mayor, donde por ejemplo se incluyan otras etapas de la vida útil del caso de estudio. Lo anterior se debe a que en Colombia no existen bases de datos, ni herramientas abiertas para determinar los impactos ambientales en el ciclo de vida de la construcción, mucho menos los impactos en salud humana. En este sentido, la utilización de la herramienta como Open Concrete (soportada en la ISO 14040) es una oportunidad para la identificación de los impactos relevantes y el desarrollo de los datos específicos de Colombia. En particular, el software permite introducir las características específicas del Clinker, la matriz energética, las distancias de transporte, diseño de mezclas, entre otros aspectos asociados al caso de estudio. Finalmente, se aclara que para desarrollar el factor de costos se actualizan los presupuestos planteados por (Medina et al., 2016) al presente año de ser necesario se hacen ajustes pertinentes y se incluye la etapa de mantenimiento.



Figura 1 *Vista general del Túnel de la Avenida Colombia (Rosero Berrío, 2023).*



Figura 2 Vista interna del Túnel de la Avenida Colombia (Rosero Berrío, 2023).

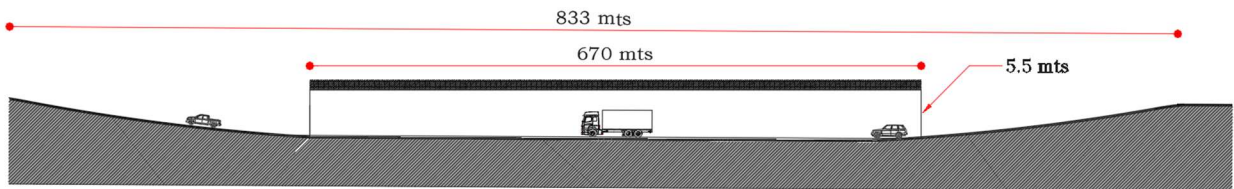


Figura 3 Perfil esquemático del túnel mundialista.

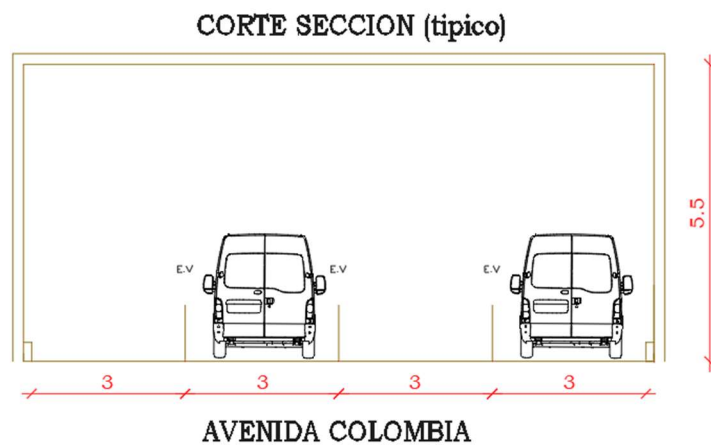


Figura 4 Sección esquemática del túnel mundialista.

1.4 Objetivos del proyecto

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el impacto sobre el ambiente, salud humana y el factor económico del uso de las nanopartículas de TiO₂ en el mortero para determinar su viabilidad en la construcción mediante un estudio de caso.

1.4.2 Objetivos específicos

El objetivo general se desarrolló mediante los siguientes objetivos específicos:

- Estimar el impacto ambiental del mortero con nanopartículas de TiO₂ por medio del Análisis del Ciclo de Vida (ACV).
- Estimar el impacto en la salud humana del mortero con nanopartículas mediante la metodología ReCiPe (del inglés *RIVM and Radbound University, CML, and Pre Consultants*).
- Valorar el impacto económico utilizando el Análisis de Costos en el Ciclo de Vida o LCC (del inglés *Life Cycle Costing*) para analizar la utilización del mortero con dióxido de titanio.

1.5 Justificación

El crecimiento acelerado de la población mundial y el desplazamiento de las zonas rurales a las grandes ciudades es un fenómeno que ha planteado grandes retos para satisfacer de forma sostenible la demanda de infraestructura y edificaciones. Esto es particularmente importante en los países en vías de desarrollo como Colombia, donde el 80% de la población reside en las ciudades principales, donde el concreto y el mortero es el principal material de construcción.

El concreto y mortero, material compuesto por agregados finos, agregados gruesos, agua, aditivos y cemento, tiene un alto impacto ambiental por la extracción de materias primas y su correspondiente procesamiento. Por ejemplo, el cemento Portland genera durante la clinkerización importantes cantidades de dióxido de carbono (CO_2). Se estima que para producir una tonelada de cemento Portland se liberan aproximadamente 0.8 a 1.0 tonelada de CO_2 a la atmósfera.

Con base en lo anterior, y sumado a otros procesos productivos, la industria de la construcción es responsable del 22% de las emisiones de gases efecto invernadero (Will et al., 2022). Por lo anterior, se vienen desarrollando materiales que, reciclando agregados o utilizando cementantes suplementarios, poseen cantidades menores de CO_2 embebido. Sin embargo, teniendo en cuenta que para el 2025 se espera neutralizar a cero las emisiones de carbono en edificaciones en ciudades como Santiago de Cali y Bogotá (World Green Building Council, 2023) se deben buscar estrategias complementarias para mitigar el calentamiento global. Una estrategia que ha tomado gran popularidad es el uso de nanopartículas de TiO_2 en el concreto para reducir la concentración de contaminantes atmosféricos y/o eliminar sustancias que afectan la apariencia estética y durabilidad de los materiales de construcción.

A pesar de lo anterior, los altos costos y la disponibilidad de las nanopartículas de TiO_2 , ha hecho que el uso de la nanotecnología en el concreto no sea muy común, especialmente en los países en vías de desarrollo. En este sentido, resulta necesario estudiar la viabilidad del mortero con nanopartículas de TiO_2 considerando los impactos ambientales, en salud humana y económicos. Esto porque los tomadores y diseñadores de decisión deben contar con información cuantitativa y cualitativa sobre el desempeño del material a lo largo del ciclo de vida de la edificación e infraestructura.

2 MARCO DE REFERENCIA

2.1 Revisión Bibliográfica

2.1.1 La nanotecnología y la construcción

El desarrollo tecnológico hace posible poner a la disposición de la industria nanopartículas de diferentes tipos, logrando desarrollar diversas soluciones en distintas áreas para facilitar los trabajos o mejorar propiedades de los materiales y como es de suponer el campo de la construcción también tiene diversas aplicaciones ya que partículas de este tipo tienen propiedades ópticas, metálicas, mecánicas, químicas y biológicas. Del uso de estas nanopartículas se han obtenido beneficios en la productividad y rendimiento del concreto o mortero ya que con el uso de estas es posible reducir el consumo de agua, emisión de gases y la inversión de recursos financieros.(Machado, 2022).

Este campo abarca dos grandes grupos, en primer lugar se tiene la nanociencia la cual responde a la caracterización de la estructura a una escala entre 0.1 y 100 nm es importante tener en cuenta que 1 nanómetro (nm) es equivalente a 10^{-9} este enfoque se encarga de estudiar y entender la estructura de las partículas y a su vez revisar su comportamiento para entender cómo afecta en las propiedades y rendimiento de los materiales en donde se emplearan. Por otra parte, la nanotecnología se encarga de desarrollar nuevos compuestos para lograr propiedades benéficas como pueden ser resistencias, durabilidad, protección ante corrosión y otros factores. (Tsotsis & Ibarra, 2018).

Los nano recubrimientos son también una aplicación muy conocida de este tipo de productos ya que generalmente se usan para protección de las superficies de maderas, piedra, vidrio, cerámicas, morteros etc. Se proporcionan ayudas a los materiales contra humedad, desgaste o para brindar propiedades hidrofóbicas, hidrofílicas, descontaminantes, anticorrosivas, fotovoltaicos y demás tipos. (Tsotsis & Ibarra, 2018).

En resumen, las nanopartículas tienen un impacto significativo en la construcción ya que logran mejorar las propiedades mecánicas de los materiales de construcción, agregar funciones que los materiales no tendrían por si solos; todo esto enfocado en facilitar el

mantenimiento, durabilidades e integración con la industria para lograr una sostenibilidad ambiental.

2.2 Fundamentos del TiO₂

Las nanopartículas de dióxido de titanio son estructuras en escala nanométrica compuestas principalmente por átomos de titanio y oxígeno. Estas partículas presentan propiedades físicas y químicas únicas debido a su tamaño reducido, lo que las hace muy interesantes para diversas aplicaciones científicas y tecnológicas. A continuación, se presentan algunos de los fundamentos de las nanopartículas de TiO₂ (Castro-Hoyos et al., 2022):

2.2.1 Tamaño y estructura cristalina

Las nanopartículas de TiO₂ suelen tener un diámetro en el rango de 1 a 100 nanómetros. A nivel estructural, el dióxido de titanio puede adoptar diferentes fases cristalinas, siendo las más comunes el rutilo (más estable), anatasa y el brookita. La estructura cristalina influye en las propiedades químicas y físicas de las partículas como se ha evidenciado en los estudios antes mencionados.(Ochoa et al., 2010)

2.2.2 Propiedades ópticas

Las nanopartículas de TiO₂ exhiben propiedades ópticas interesantes. En particular, pueden absorber luz ultravioleta (UV) debido a su banda de energía de excitación amplia (banda prohibida). Esto ha llevado a su utilización en aplicaciones como recubrimientos fotocatalíticos. (Bohórquez et al., 2016)

2.2.3 Propiedades fotocatalíticas

Las nanopartículas de TiO₂ son conocidas por sus propiedades fotocatalíticas, lo que significa que pueden catalizar reacciones químicas mediante la absorción de luz. En presencia de luz ultravioleta, las partículas de TiO₂ pueden descomponer compuestos orgánicos y contaminantes en sustancias menos tóxicas o incluso en dióxido de carbono y agua. Esta capacidad fotocatalítica es fundamental para la purificación del aire y la autolimpieza que se busca en el concreto con nanopartículas de TiO₂.(Mosquera E. et al., 2015)

2.2.4 Estabilidad química

El dióxido de titanio es químicamente estable y no tóxico. Esto es importante para garantizar su seguridad en diversas aplicaciones, especialmente aquellas que implican su uso en contacto con el medio ambiente o con organismos vivos(Ochoa et al., 2010).

2.2.5 Superficie y reactividad

Las nanopartículas de TiO_2 presentan una gran área superficial en comparación con su volumen, lo que las hace altamente reactivas. Esta alta reactividad superficial permite una mayor interacción con moléculas y compuestos en su entorno, facilitando así su capacidad para catalizar reacciones químicas y fotocatalíticas.

Estos fundamentos de las nanopartículas de TiO_2 han llevado a su aplicación en diversas áreas, como la fotocatálisis, la purificación del aire, la energía solar, la medicina y la industria de los materiales. Sin embargo, es importante seguir investigando y evaluando su impacto ambiental, económico y social para garantizar su uso seguro y beneficioso en diferentes aplicaciones. (Ochoa et al., 2010)

2.3 Las nanopartículas y sus aplicaciones en el concreto y mortero.

Específicamente en para el contexto del mortero se realizará un estudio de ciclo de vida haciendo una valoración integral del elemento para establecer el objetivo, unidades funcionales, límites del sistema y una asignación de restricciones. De esta forma se logrará presentar un análisis detallado y definir si es viable o no el mortero de estudio, como lo hace Braga et al., (2017) en su estudio del impacto ambiental y económico del concreto con agregados gruesos naturales y reciclados.

Es importante resaltar las ventajas y utilidades de las nanopartículas de TiO_2 en el campo de la ingeniería civil y la construcción ya que el uso de las mismas se ha podido implementar tanto en morteros como en concretos según la investigación de Moro et al., (2020a) en la cual se muestra la capacidad de absorción de CO_2 con un bajo porcentaje de adición de nanopartículas, además se descubren otros efectos proactivos durante su vida útil como la disminución de la permeabilidad al cloruro, resistividad eléctrica y absorción del agua en morteros logrando formar una microestructura más densa y por lo tanto mejorando su durabilidad. De igual forma, se comprueba

que las nanopartículas no afectan al curado del mortero; por el contrario, se encuentra una unión más fuerte entre el agregado y la pasta. Por otra parte, se comparte la fracción de nanopartículas de TiO_2 que afecta al concreto y muestra las características ambientales para que el material pueda dar su máximo desempeño tales como el caudal del aire, la concentración de NO , intensidad de rayos UV y humedad relativa (Yang et al., 2019; Saeli et al., 2017).

De igual forma se descubren los efectos benéficos de esta nanopartícula y se posiciona por encima de otras como en la investigación de Amor et al., (2022), en donde se estudia el comportamiento de las nanopartículas de TiO_2 y ZnO en muestras de cemento, después de un estudio de impactos se obtiene que existe una mejora en la hidratación del cemento y como era de esperar el efecto fotocatalítico para remover las partículas de NO_x , sin embargo se encuentra una característica que para este caso de estudio llama la atención y es el mejor desempeño que tienen las nanopartículas de TiO_2 en el proceso de purificación del aire. Como se evidencia anteriormente esta nanopartícula puede trabajar con otros compuestos; otro ejemplo es el SiO_2 en la investigación de Khannyra et al., (2022), en la cual se estudió las propiedades descontaminantes de los recubrimientos de TiO_2 y SiO_2 sobre el concreto. En este trabajo se estudia principalmente la eficiencia y la degradación de estas capas, encontrando un aumento en la eficiencia fotocatalítica y la durabilidad de la autolimpieza, aunque existe una ligera disminución. No obstante, se mantiene su tendencia de degradación de NO_x .

Es importante establecer el porcentaje de reemplazo óptimo de las nanopartículas en el concreto o mortero; una base de este estimado se encuentra en la investigación de Praveenkumar et al., (2019), en la cual se hace el estudio de impacto en la resistencia del concreto haciendo uso de las nanopartículas de dióxido titanio y cenizas de cascara de arroz. En este trabajo se hizo el remplazo del 3% y 10% de las cantidades de cemento Portland, respectivamente, consiguiendo mejorar las propiedades del concreto, tales como resistencia a la compresión, tracción y flexión. Adicionalmente, se vuelven a identificar una resistencia adicional ante los ataques de cloruros y ácidos, de igual forma en este estudio se logra evidenciar la compatibilidad de las nanopartículas con varios subproductos como adiciones minerales o agregados reciclados.

Por su parte, con el ánimo de identificar cómo afectan el tamaño de partícula y forma al desempeño en el concreto, como lo muestra Meng et al., (2020), utilizando adoquines de concreto reforzado con nanotubos de TiO_2 , se presenta una mejora en el enlace con el gel CSH y un

incremento en la eficiencia de la eliminación de NO_x luego de exposición a 110 min de radiación solar (rayos UV).

Actualmente hay diversos avances que son importantes para entender el efecto de las nanopartículas en concretos y morteros, ya que estas funcionan muy bien en la reducción de contaminantes en varios materiales de construcción, Gopalan et al., (2020) identifican una propiedad adicional como resulta la dispersión de partículas en base a el potencial Z, gracias a esta diferencia de potencial se produce un efecto de filler y se ayuda a una correcta dispersión de las nanopartículas de TiO_2 y las partículas de cemento.

Teniendo en cuenta que es de suprema importancia tener información sobre el impacto de las nanopartículas en el medio ambiente, por su parte Moro et al., (2020a) evaluó la sostenibilidad de las nanopartículas valorando el proceso productivo en unidades de m^3 mediante el diseño de mezcla; si bien encuentra un efecto nocivo de las nanopartículas, un análisis a largo plazo mostró que es un material que tiene potencial de mejora medioambiental, considerando sus efectos en la vida útil y la durabilidad. Se calcula además cual es el porcentaje necesario de nanopartículas para igualar el impacto medioambiental, este número puede variar dependiendo del uso. En este sentido, es importante tener noción del porcentaje para saber si es siquiera considerable en otras aplicaciones; este estudio arroja un valor del 0.5% de nanopartículas, lo cual es un porcentaje bastante bajo teniendo en cuenta que se ha encontrado que las nanopartículas trabajan bien con porcentajes del 3% y hasta el 10% (Castro-Hoyos et al., 2022).

Para una correcta estimación del contenido óptimo de nanopartículas, es importante contar con información del comportamiento del concreto en diferentes edades. Castro-Hoyos et al., (2022) analiza varios grados de concentración de TiO_2 mostrando cual es el más eficiente.

El uso de las nanopartículas abarca incluso el campo del concreto de alta resistencia. Por ejemplo, Nazari & Riahi, (2010) encontraron buenos resultados con un 4% de adición, logrando formar un concreto altamente impermeable, gracias a las propiedades de filler, el cual llena los poros del concreto.

Como era de esperarse, el uso de este tipo de materiales también trae beneficios en el campo de la arquitectura como lo muestra Cassar et al., (2003) en su estudio de un cemento blanco para concreto arquitectónico, el cual demostró buen desempeño manteniendo la superficie de las estructuras limpias, manteniendo sus apariencia estética sin afectaciones significativas a través del

tiempo. En este sentido, se encuentran diversas aplicaciones de este tipo de mortero premezclado para la rehabilitación estructural de superficies deterioradas, pinturas cementosas, restauración de obras de arte y su uso en morteros para yesos. Es importante tener en cuenta estos usos ya que la conservación del patrimonio es de amplio interés a nivel mundial y por su puesto consume una parte importantes de recursos económicos y ambientales.

También se aprecia su desempeño y aplicación en la Iglesia Divas de la Misericordia apoyada por Cassar (2004), quien presenta un estudio de la efectividad del cemento autolimpiante, lo cual demuestra la aplicabilidad y viabilidad en las estructuras. De igual forma se muestran otras aplicaciones en el campo de las pinturas con fotocatalizadores y sus aplicaciones en otro tipo de edificios.

Es importante en este estudio también entender las limitaciones de este tipo de concretos o morteros, ya que en la investigación de Atta-ur-Rehman et al., (2018) se realiza un análisis del comportamiento del concreto con TiO_2 frente a los ataques de sulfatos. Se aprecia que el concreto con esta adición se encuentra susceptible ante estos efectos. Esto se da porque las nanopartículas reducen el tamaño de los poros gruesos por lo que la presión de cristalización provoca un daño mucho mayor en la matriz del concreto.

Finalmente, se refuerza aún más las características anteriormente expuestas de las nanopartículas de TiO_2 con Bersch et al., (2023) , quienes hacen una revisión sistemática de literatura y queda más que claro la efectiva actividad fotocatalítica, las propiedades de autolimpieza y micobacterianas.

2.4 Fotocatálisis del TiO_2

La fotocatálisis del TiO_2 es un proceso químico en el cual las nanopartículas de dióxido de titanio actúan como catalizadores cuando se exponen a la luz ultravioleta. Este proceso implica la generación de pares de electrones y huecos en la estructura cristalina del TiO_2 cuando se absorbe energía de la luz UV. Mas específicamente cuando el TiO_2 en escala nano es expuesto a los rayos UV que provienen del sol o de manera artificial (i.e. uso de lámparas), se convierten en energía química, logrando así, una excitación de los electrones presentes en la banda de valencia; esta acción hace que los electrones superen la carga de la banda prohibida, haciendo que se transporten a la banda de conducción, donde no hay electrones. Después de este proceso se genera un hueco energético resultante del electrón que se desplazó a la banda de valencia, el cual luego reacciona

con las moléculas de agua que están presentes en el ambiente, produciendo especies oxidantes como los radicales hidroxilos (OH). (Medina et al., 2016)

En este proceso se logran generar reacciones oxidantes y también de reducción, lo cual brinda las características más aclamadas de estas nanopartículas; ósea la capacidad de eliminar partículas contaminantes orgánicas y no orgánicas (Castro-Hoyos et al., 2022). Este proceso puede observarse de forma resumida en la Figura 5.

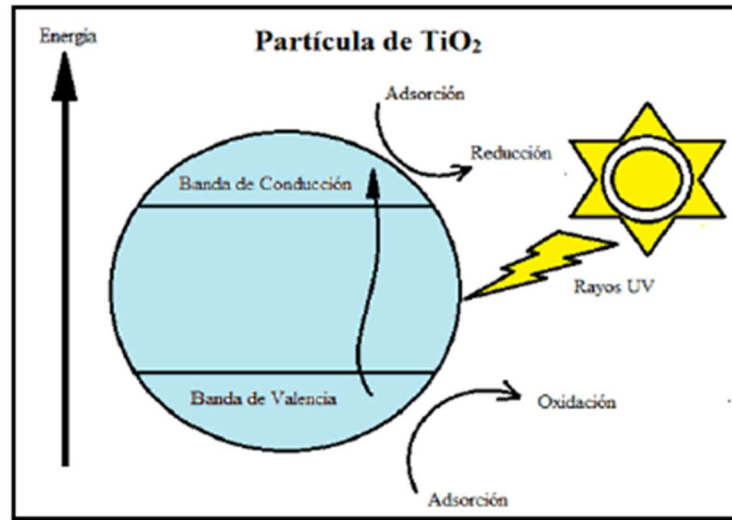


Figura 5 Proceso de fotocatalisis nanopartículas TiO_2 (Medina et al., 2016).

2.5 Efectos sobre la salud humana

El material particulado y las sustancias contaminantes tienen un alto impacto en la salud humana y más aún en los túneles en donde hay una alta concentración de estos contaminantes dados que prestan servicio a los automóviles que son una de las principales fuentes de contaminación en el mundo. Aunque los vehículos han disminuido sus niveles de emisión de contaminantes con el pasar de los años y el avance de la tecnología automotriz, aún este aspecto se mantiene relevante a nivel urbano, especialmente en lugares cerrados como es el caso de los túneles, especialmente los de gran longitud como el Túnel de la Avenida Colombia (caso de estudio). (Vargas Urbano et al., 2011)

Por otra parte, a continuación, se describen algunas de las sustancias contaminantes que pueden ser degradadas por las nanopartículas de TiO_2 son contaminantes atmosféricos comunes:

2.5.1 Contaminantes atmosféricos

Son actualmente uno de los problemas ambientales de mayor preocupación en Colombia debido a sus impactos en la salud y en el medio ambiente, además un dato importante es que es el tercer factor de costos sociales después de la contaminación del agua. Este tipo de contaminantes son aquellos emitidos a la atmósfera por una fuente de emisión o son resultado de reacciones en la atmósfera a partir de contaminantes primarios. En este tipo de contaminantes se encuentran gases como NO_x , SO_x y CO los cuales fueron objeto de estudio en el presente documento (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, s. f.-a).

2.5.2 Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Los gases NO_x son óxidos de nitrógeno, los cuales son un grupo de compuestos químicos que se forman de la combinación del nitrógeno y oxígeno. Los tipos más comunes de nitrógeno son el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2); estos son contaminantes atmosféricos bastante significativos debido a su impacto en el ambiente y en la salud humana. Resultan de la combustión de combustibles fósiles a altas temperaturas, que es básicamente una de las fuentes principales de energía en Colombia, a nivel de industria con procesos de quema en la agricultura y la quema de biomasa, centrales eléctricas y en el día a día de los habitantes del mencionado país. Un ejemplo claro es el transporte, ya que actualmente los vehículos que predominan son a base de combustibles fósiles, vehículos particulares y de servicio público. La migración a otras fuentes más amigables con el ambiente apenas se ve implementada en el transporte público con buses a base de gas o 100% eléctricos, sin embargo, se estima que el 99.8% de los vehículos funciona a base de gasolina; camionetas y camperos están con un 86%, siendo el otro 14% mayormente a base de diésel (David Escobar, 2019), que sigue siendo un combustible que tiene grandes emisiones al ambiente.

Cuando este tipo de óxidos están en el ambiente, son rápidamente degradados al reaccionar con otras sustancias del aire. Un ejemplo es cuando entran en contacto con la luz solar y forman el ácido nítrico, generando así la conocida lluvia ácida. Se forma de igual manera el dióxido de nitrógeno, que, al reaccionar con la luz, se forma ozono y smog en el aire que se respira. Estos compuestos afectan de diversas formas la salud humana; en bajas cantidades pueden irritar los ojos, nariz, garganta y pulmones, causando tos, falta de aliento, cansancio y náuseas.

La exposición a este nivel también produce acumulación de líquido en los pulmones luego de 1 o 2 días de exposición; esto es en niveles bajos de exposición y tiene consecuencias que pueden ser fatales, ya que, si no se tratan a tiempo, puede causar la muerte. No obstante, también está la otra parte, y es en altos niveles de exposición, en esta situación se pueden producir quemaduras, espasmos y dilatación de los tejidos en la garganta o vías respiratorias, acumulando igualmente líquido en los pulmones y causando así la muerte (Atsdr, 2002).

2.5.3 Óxidos de Azufre (SO_x)

Los óxidos de azufre son compuestos químicos resultantes de la combinación de azufre y oxígeno, uno de los tipos más comunes son el dióxido de azufre (SO₂). Sin embargo, en la atmósfera, estos compuestos generalmente se combinan con el agua y forman ácido sulfúrico (H₂SO₄). Al igual que los NO_x se generan por la combustión, pero con el factor diferenciador de que se producen en aquellos procesos que involucran al azufre. Se producen a partir de la quema de carbón, petróleo, combustibles en vehículos e industrias como la fundición de metales y la fabricación de productos químicos, procesos vitales para cualquier país ya que estos últimos son pilares de varios sectores económicos. Este tipo de compuestos pueden provocar lluvia ácida al combinarse con partículas o la humedad del aire, formando ácido sulfúrico, lo que daña los cultivos, bosques, animales y contribuye a la acidificación de los océanos.(ECHA, 2019)

En cuanto a la salud humana, son compuestos en forma de gas que irritan y son altamente tóxicos; afectan las mucosidades y pulmones, generando tos. La exposición a altas concentraciones puede irritar el tracto respiratorio, causar bronquitis, asma, espasmos, reflejos, parada respiratoria y congestión de los conductos bronquiales de los asmáticos (OMI, 2020).

2.5.4 Monóxido de Carbono (CO)

Es un gas incoloro que se encuentra en el aire tanto en interiores como exteriores. Se produce cuando el combustible de carbón se quema completamente; las actividades humanas y naturales son fuentes importantes de este gas, siendo una de las principales la emanación de tubos de escape de los automóviles. Estos factores varían dependiendo de la

presencia de artefactos como calentadores de ambientes de queroseno o gas, calderas, estufas de leña, generadores y otros equipos que funcionen con gasolina.

Cuando se libera al medio ambiente, el CO puede permanecer en él hasta por 2 meses. Las personas pueden exponerse al respirar el gas proveniente de algún artefacto que lo genere, o cuando permanecen durante mucho tiempo en un entorno donde se manipule o se deriven sustancias que lo produzcan, es prioritario evitar el contacto con este gas ya que la intoxicación por carbono es la causa principal de muerte en Estados Unidos. La inhalación de este gas provoca dolores de cabeza, náuseas, vómitos, mareos, visión borrosa, insuficiencia cardíaca, convulsiones y coma; las personas que tienen enfermedades cardíacas o pulmonares son más vulnerables a sus efectos (Atsdr, 2009).

Estos contaminantes tienen una gran presencia a nivel mundial. En el caso de estudio del túnel de la avenida Colombia, esto cobra más relevancia, ya que uno de los emisores de los tres compuestos mencionados son los escapes de los automóviles que funcionan con combustibles fósiles, situación que en Colombia y en la ciudad de Cali aplica para más del 80% del parque automotor en general. Con esto en mente, se puede considerar al túnel como un foco de contaminación que afecta la salud humana y la calidad del aire de la zona. Por lo tanto, es de vital importancia analizar alternativas para hacer de estos espacios lugares seguros y reducir al máximo los efectos nocivos de nuestro día a día. En el caso de este estudio, se evalúa la viabilidad de implementar nanopartículas de TiO₂ para reducir la exposición a estos contaminantes a niveles aceptables, evitando enfermedades que afecten a los habitantes de las zonas y los efectos adversos en el ecosistema, la vegetación, la acidificación de cuerpos de agua y la biodiversidad. Todo esto en pro de contribuir indirectamente al cambio climático y el calentamiento global, cumpliendo con las regulaciones y normativas establecidas, como la resolución 2254 (Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible, 2017a).

2.6 Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

De acuerdo con la norma 14040 (ISO, 2006) y la norma E917 – 17 (ASTM, 2017), el ACV es una metodología que evalúa los impactos ambientales asociados con todas las etapas de la vida de un producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Este análisis es también conocido por sus siglas en inglés LCA (Life Cycle Assessment).

Hay varias etapas de este análisis, en primer lugar, se tiene la definición del objetivo y alcance; en esta fase se establece el propósito del estudio y describe la profundidad con los límites del sistema de producto que se evaluará. Esto incluye la definición del sistema con sus límites, las unidades funcionales, y los criterios para la inclusión de flujos de materiales y energía.

Seguida a esta etapa se tiene un análisis del inventario, en donde se realiza una recopilación de datos y el cálculo de entradas y salidas para un sistema de producto dado. Esto incluye todas las entradas (materiales y energía) y todas las salidas (emisiones, residuos) asociadas con las etapas del ciclo de vida del producto. Con esta información se puede pasar a la etapa de evaluación del impacto del ciclo de vida; fase en la cual se analiza la contribución potencial de los datos de inventario a los impactos ambientales específicos, basándose en la metodología predefinida en la fase de definición del objetivo y alcance. Esto implica la selección de categorías de impacto (como el calentamiento global, la toxicidad, la eutrofización, entre otras), indicadores y modelos de caracterización. Finalmente, se encuentra la interpretación, donde los resultados de las fases de inventario y de evaluación de impacto se resumen y discuten en el contexto del objetivo y alcance original del estudio. Esto puede incluir la identificación de áreas significativas de impacto, la evaluación de la robustez de los resultados y la formulación de recomendaciones basadas en los resultados del ACV.

2.7 Análisis de Costos en el Ciclo de Vida (LCC)

De acuerdo con la normativa 15686-5 (ISO, 2017) y la norma E917 – 17 (ASTM, 2017), el LCC se dicta en el contexto de la construcción y las obras de ingeniería civil. Esta norma proporciona un marco para calcular y considerar los costos de ciclo de vida de los edificios y otro tipo de estructuras, abarcando desde la fase de planificación hasta su disposición final. Es un proceso de estimación de todos los costos que conlleva realizar una obra durante su vida útil. Esto incluye los costos iniciales, como los de diseño y construcción, así como los costos operativos, de mantenimiento, y eventualmente los de disposición o desmantelamiento.

Se plantean unos objetivos como lo es la planificación financiera, esto para proporcionar ayuda a los responsables y operadores de las estructuras para así prever los costos futuros relacionados con el activo. Por lo anterior, en un LCC la decisión de inversión es tomada comparando diferentes opciones de diseño y construcción con sus respectivos costos a lo largo del ciclo de vida (i.e. etapas de diseño, construcción, operación, mantenimiento y fin de ciclo).

2.8 Impacto en la salud humana mediante la metodología ReCiPe

El impacto de salud humana se realiza mediante la metodología ReCiPe, es un sistema de evaluación de impacto que se utiliza en el análisis de ciclo de vida para cuantificar y evaluar los efectos ambientales de un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida, con esta información ReCiPe proporciona un conjunto de factores de caracterización para convertir las emisiones y extracciones de recursos listados en el análisis de inventario del ciclo de vida, en una variedad de posibles impactos ambientales, incluidos aquellos relacionados con la salud humana.

Los impactos sobre la salud humana en el método ReCiPe incluyen efectos como la toxicidad humana, la exposición a partículas finas, la radiación ionizante, entre otros. Estos impactos se evalúan mediante modelos específicos dentro de la metodología.

Si bien ReCiPe no está regulado por una norma ISO específica, se desarrolla y actualiza a través de un proceso colaborativo entre varias instituciones académicas y de investigación, incluidos el Ministerio de Vivienda, Ordenación del Territorio y Medio Ambiente (VROM) de los Países Bajos, la Universidad de Radboud, y el Instituto de Investigación de Impacto Ambiental PRE (Manual de la metodología RIVM, 2017).

Como se menciona anteriormente, esta metodología permite la evaluación de impacto dentro del marco proporcionado de las normas ISO 14040 y 14044 para llevar a cabo la ACV. Como tal, proporciona una manera de traducir las entradas y salidas ambientales cuantificadas en el análisis de inventario del ciclo de vida en indicadores de impacto que reflejan los posibles daños ambientales y a la salud humana.

3 METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo de grado se va a revisar la viabilidad de implementar el mortero con nanopartículas de TiO_2 para ello es necesario tener información de proyectos ya implementados o de análisis de laboratorio para trabajar con la información y determinar los impactos definidos en los objetivos. Dado que se estamos en el contexto Colombiano se busca un caso de estudio de la regio y si es posible de la ciudad de Cali ya que es el contexto con el cual se tiene un mejor acercamiento, con todos estos parámetros se elige el caso de estudio de Medina et al., (2016) el cual elabora un diseño de un sistema para generar purificación del aire y autolimpieza en las superficies del túnel de la avenida Colombia en la ciudad de Cali; en primer lugar se realiza el diseño de mezcla para el mortero el cual consigue una resistencia de 19.995 Mpa, a parte de la resistencia a flexión se realizan diferentes estudios para caracterizar completamente la mezcla de estudio, después se simulan los rayos UV que serán generados mediante unas lámparas que fueron instaladas en una caja para estudiar la exposición de las muestras de mortero con nanopartículas. Para la adición de las nanopartículas de dióxido de titanio en el mortero se hacen mediante una solución diluida en agua y un polvo fino de alta pureza estos recubren a las muestras de mortero y de esta forma se obtiene el nanomaterial. Para la fase experimental se contamina a las muestras con colorante para estudiar su evolución y seleccionar el modelo para cuantificar el porcentaje removido de emisiones por el material fotocatalítico.

Para el presente estudio se pretende proyectar la obra de instalar el mortero con nanopartículas de TiO_2 en los marcos de impacto ambiental, salud humana y económico, se deberán fabricar 308.2 m^3 de mortero para aplicar en las paredes y cubiertas del túnel mundialista en una capa de 2 centímetros, requiere una actualización de luminarias fluorescentes y durante 50 años será necesario proyectar el mantenimiento necesario para salvaguardar la efectividad de las propiedades del material.

Con el contexto del caso de estudio se describe la metodología de investigación utilizada para el desarrollo de este proyecto, la cual consiste en tres grandes fases que son: análisis del ciclo de vida, estimación del impacto en salud humana y análisis de costos en el ciclo de vida Figura 6

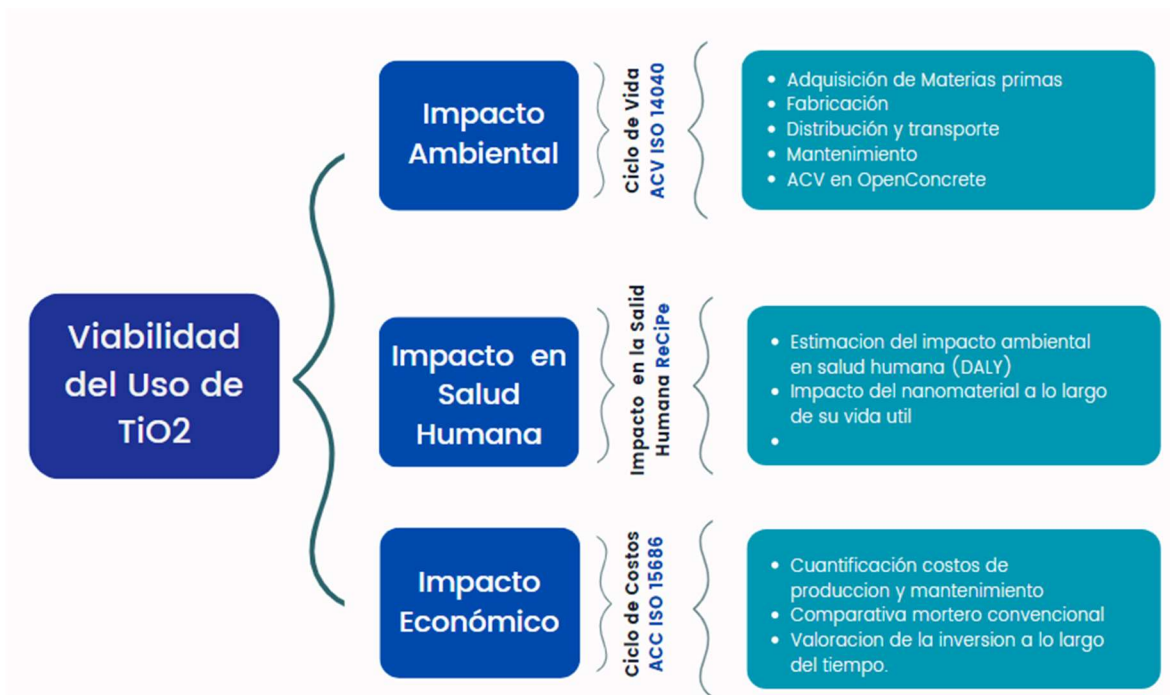


Figura 6 Metodología de trabajo para evaluación del impacto ambiental, en salud humana y económica del mortero con nanopartículas de TiO₂.

3.1 Análisis del ciclo de vida

Para esta estimación, se utilizó el software OpenConcrete en su versión del 2021 (Base de datos EcoInvent). Open concrete es una herramienta para estimar los impactos ambientales de la producción de concreto y mortero que se encuentra soportada en la ISO 14040. Los impactos se centraron en las emisiones de gases de efecto invernadero, la demanda de agua y las emisiones de contaminantes atmosféricos. Considerando que los métodos de estandarización de producción de cemento colombiano se encuentran soportados en la ASTM de los Estados Unidos, en esta herramienta se realizó un análisis de escenario para producir una mezcla representativa del material bajo las condiciones de los 50 estados de EE.UU., de los cuales algunos presentan condiciones compatibles con Colombia, haciendo viable la utilización del método. Se recalca que en Colombia no existen bases de datos, ni herramientas abiertas para determinar los impactos ambientales en el ciclo de vida de la construcción por ello se utiliza la herramienta Open Concrete para identificar los impactos más relevantes y desarrollar con los datos específicos de Colombia

Es importante tener en cuenta que la realización de un análisis de ciclo de vida de forma precisa requiere datos específicos al contexto local; en Colombia la disponibilidad de las bases de datos detalladas en el campo de construcción es limitada. Por lo tanto, esta es otra razón para usar

la base de datos de Ecoinvent la cual es ampliamente reconocida a nivel internacional ya que hay una similitud en los procesos de producción lo cual permite una aproximación razonable.

Si bien se reconoce que el cemento producido en Estados Unidos y Colombia tiene variaciones en las materias primas, procesos de producción y regulaciones ambientales, las tecnologías y las practicas industriales tienen una convergencia significativa, lo que permite utilizar los datos para mantener la perspectiva para proporcionar la postura frente al nanomaterial. Aunque dicha aproximación no sea la ideal proporciona una base sólida y confiable para realizar el ACV con el objetivo de incentivar el desarrollo de bases de datos locales abiertas en el futuro y dar una postura frente al uso del mortero con nanopartículas de TiO_2 .

El programa recibió los datos de entrada para producir 1 m^3 de mortero con la dosificación del estudio de caso del túnel de la avenida Colombia en la ciudad de Cali (Medina et al., 2016). Se incluyeron los datos reales de transporte para los agregados, así como los consumos de combustibles y energía del horno y los procesos de fabricación del Clinker y producción del mortero, información obtenida de (XM S.A.E.S.P, 2023) se presenta un boletín energético en el cual se estudian las variables del SIN que es en donde se integran todos los sistemas eléctricos regionales del país desde las centrales de generación hasta los pueblos y ciudades donde se presta el servicio finalmente. Con esta información, se consiguieron las emisiones mencionadas anteriormente.

Para la estimación de emisiones mediante el software mencionado se establecen los datos de entrada, sin embargo se contextualiza la obra para analizar, se requiere instalar una capa de mortero de 2cm de espesor en las paredes laterales del túnel y en la cubierta para aprovechar al máximo las propiedades de degradación de las nanopartículas, cabe destacar que si bien la longitud total de la obra es de 833 metros donde realmente se aplicara el mortero para que interactúe con los rayos UV de las lampara es en el tramo neto del túnel es decir 670 metros, por lo tanto teniendo en cuenta que la altura es de 5.5 metro y pose 4 carriles de 4 metros cada uno el área de aplicación del nanomaterial es de 15.410 m^2 o 308.20 m^3 de mortero para aplicar.

Para determinar el impacto de la elaboración del nanomaterial se define la unidad funcional de 1 m^3 de mortero convencional ya que el análisis de emisiones se realizará por separado para el mortero y las nanopartículas durante un período de 50 años, el cual corresponde a la vida útil para infraestructura de este tipo.

Se ingresan los datos de entrada que para el caso de estudio es el diseño de mezcla del mortero el cual tiene una densidad de 2.294 Kg/m^3 , se ingresan los datos de consumo energético:

- Se mide la energía para encender el horno, con los datos del boletín energético se ingresa el % de energía consumida por la fuente utilizada para este proceso en este apartado se ingresa 70% para el carbón, 15% para el aceite y 15% para el gas natural.
- Para el proceso de mezclado eléctrico se ingresan los mismos porcentajes de la energía para encender el horno ya que el tipo de energía utilizada para estos procesos es igual.
- Finalmente, para el proceso de los agregados se ingresan los siguientes consumos, 12% de carbón, 1% de aceite, 25% de gas natural, 1% de biomasa, 59% de energía hidroeléctrica, 1.8% de energía solar y 0.1% de energía eólica.

No obstante, fue necesario incluir los parámetros de contaminación de las nanopartículas, para lo cual se tomó como base estudios y bibliografía de investigaciones anteriores. Se utilizó el análisis del ciclo de vida de (Moro et al., 2020) para obtener datos de emisiones de NO_x , SO_x y CO .

El estudio mencionado (Moro et al., 2020) hizo pruebas con 12 mezclas de diferentes porcentajes de sustitución de nano TiO_2 con porcentajes de sustitución del 0%, 0.5%, 1% y 2% y una sustitución parcial de agregados reciclados con porcentajes del 0%, 50% y 100%. Se realizó un análisis de ciclo de vida centrado en la producción de los materiales. La unidad funcional fue m^3 la premisa del análisis es mantener la resistencia del mortero. Se utiliza un cemento portland tipo I y se realiza para cada una de las mezclas 3 primas de diferentes dimensiones de $40 \times 40 \times 160$ mm de acuerdo con la normativa aspectos en los cuales se centró toda la investigación. Se realizan las suposiciones de acuerdo con información de diferentes bases de datos y 7 categorías como la metodología TRACI, GWP, ODP, EP, AP, S, RE y CE. Con el mencionado estudio se toman las emisiones de los gases mencionados.

Con el software se obtienen las emisiones por separado del mortero y de las nanopartículas de TiO_2 el software arroja los valores de 1 m^3 teniendo en cuenta que el mortero se aplica en las paredes, cubierta y tiene un espesor de 2cm los metros cúbicos que se van a producir son de 308.2 m^3 y dado que los valores de emisión están expresados en kg/m^3 de mortero fabricado se logra determinar el impacto de fabricar esta estructura.

Para la etapa de mantenimiento se hacen los cálculos en base a la investigación de (Moro et al., 2020) se tienen los datos de microgramos por metro cúbico. El volumen del túnel se calcula en base a la geometría de este ósea 55.000 m^3 , por lo tanto, se tiene el valor de conversión multiplicado por el tiempo de exposición, el volumen del túnel y por supuesto la conversión de microgramos a kilogramos. Este proceso se repite para el cálculo del día el cual se define será de 16 horas y el año de 5760 horas.

En este análisis se incluye un cálculo de tiempo de compensación de las emisiones ya que se quiere saber si la implementación es conveniente, para esta estimación se tiene en cuenta las emisiones de fabricación; después con los datos recopilados del caso de estudio se calculan las emisiones que generará el túnel en los periodos de 1 hora, 1 día y finalmente 1 año; con estos datos se podrá proyectar cuales son las emisiones finales producidas en 50 años. Como se conoce que la efectividad de adicionar el 5% de las nanopartículas al mortero es de un 49% hablando en términos de reducción de gases si se hace el cálculo con las emisiones totales de 50 años se puede determinar en cuantos años se pueden alcanzar los niveles de fabricación y saber el tiempo estimado para realizar la mencionada compensación.

3.2 Estimación del impacto en la salud humana (ReCiPe)

Con la información del ACV, fue posible estimar el impacto en términos de salud humana, transformando varios indicadores ambientales en unidades de salud Figura 7.

El método RECIPE requiere definir el área de protección o punto final, que en este caso es el daño a la salud humana (Manual de la metodología RIVM, 2017).

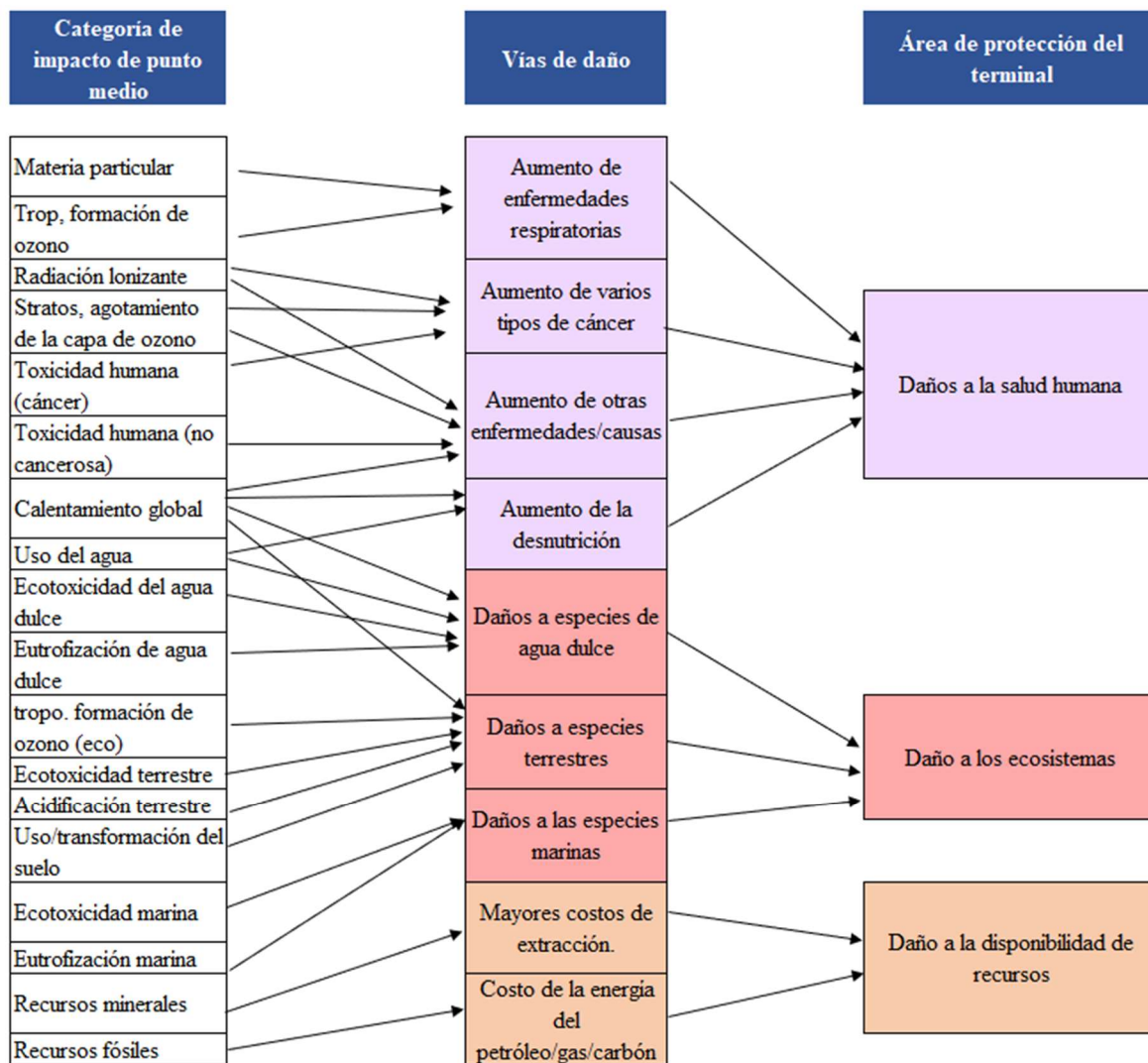


Figura 7 Metodología RECIPE modificado de RIVM, (2017).

Se debe seleccionar los enfoques con los que se requiere trabajar, después se deberán caracterizar los factores de análisis para alcanzar el punto medio (Manual de la metodología RIVM, 2017). El punto medio es una unidad de conversión a la cual se llega mediante un factor de caracterización, todo ello con el fin de transformar los kilogramos de los componentes a años perdidos de vida por enfermedad o discapacidad, definido por RECIPE como DALY (Años de Vida Ajustados por Discapacidad). Esta es la unidad funcional en la que se mide el impacto para la salud humana. Las factores mencionados permitirán realizar la conversión y establecer la compatibilidad del sistema con los parámetros de contaminación de OpenConcrete y RECIPE. Más detalles en la Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1 Categorías de punto medio e indicadores de impacto modificado de RIVM, (2017).

Categoría de impacto	Indicador	Unidad	FQ_{metro}	Abr.	Unidad
cambio climático	Aumento del forzamiento radiactivo infrarrojo	WX año/m ²	potencial de calentamiento global	PCG	kilogramos CO ₂ ti aire
agotamiento del ozono	disminución del ozono estratosférico	ppt x año	potencial de agotamiento del ozono	PAO	kg CFC 11 al aire
radiación ionizante	aumento de la dosis absorbida	hombre x Sv	potencial de radiación ionizante	PIR	kBq Co-60 al aire
Formación de oxidantes fotoquímicos: calidad del ecosistema.	aumento del ozono troposférico (AOT40)	ppb.año	Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos: ecosistemas	EOFP	kg NOx al aire
Formación de oxidantes fotoquímicos: salud humana.	Aumento de la ingesta de ozono troposférico en la población (M6M)	kg	Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos: humanos	HOFP	kg NOx al aire
acidificación terrestre	protón aumento de suelos naturales	año xm ² mol l/l	terrestre potencial de acidificación	GRIFO	kg ASI QUE ₂ al aire
eutrofización de agua dulce	aumento de fósforo en agua dulce	año xm ³	potencial de eutrofización de agua dulce	FEP	kg P a agua dulce
Eutroficación marina activada	Aumento del nitrógeno inorgánico disuelto en el agua marina.	Año kgO ₂ /kg norte	potencial de eutrofización marina	eurodiputado	Kg N al agua de mar
toxicidad humana: cáncer	aumento del riesgo de incidencia de enfermedades cancerosas	-	potencial de toxicidad humana	HTPc	kg 1,4-DCB al aire urbano
toxicidad humana: no cancerígena	aumento del riesgo de incidencia de enfermedades no cancerosas	-	potencial de toxicidad humana	HTPnc	kg 1,4 DCB al aire urbano
ecotoxicidad terrestre	aumento ponderado por riesgo en suelos naturales	año x m2	potencial de ecotoxicidad terrestre	TETP	kg 1,4- DCB para industria
ecotoxicidad de agua dulce	aumento ponderado por peligro en aguas dulces	año x m3	potencial de ecotoxicidad del agua dulce	FETP	kg 1,4- DCB a agua dulce
ecotoxicidad marina	aumento ponderado por peligro en el agua marina	año x m3	potencial de ecotoxicidad marina	METP	kg 1,4- DCB al agua marina
uso del suelo	Ocupación y transformación integrada en el tiempo.	año m ²	potencial de ocupación de tierras agrícolas	PODAR	m2 año tierra de cultivo anual

Categoría de impacto	Indicador	Unidad	FQ_{metro}	Abr.	Unidad
uso del agua	aumento del agua consumida	m ³	potencial de consumo de agua	PCC	m3 agua consumida
mineral escasez de recursos	disminución de la ley del mineral	kg	potencial excedente de mineral	COMPENSACIÓN	kgCu
fósil escasez de recursos	superior valor de calentamiento	mj	potencial de combustibles fósiles	FFP	kg de aceite

Tabla 2 Factores de caracterización específicos de cada país. Modificado de RIVM, (2017)

Factores de caracterización específicos de cada país		HOFP (kg NOx-eq kg-1)		EOFP (kg NOx-eq kg-1)	
		Sustancia emitida			
		NOx	NMVOC	NOx	NMVOC
World Weighted Average	World	1	0.18	1	0.29
Kazakhstan	Europe	0.66	0.15	2.84	0.37
Rest of former Soviet Union	Europe	1.04	0.19	3.32	0.42
Russia, Armenia, Georgia, Azerbaijan	Europe	0.55	0.24	1.78	0.64
Eastern part of Russia	Asia	0.74	0.11	2.8	0.2
Ukraine, Belarus, Moldavia	Europe	0.75	0.29	1.85	0.78
South Korea	Asia	0.05	0.84	1.4	1.28
Japan	Asia	-0.12	0.5	0.8	0.71
Australia	Oceania	0.27	0.02	0.08	0.02
New Zealand	Oceania	0.09	0.01	0.03	0
Pacific Islands, Papua New Guinea	Oceania	0.4	0.01	0.2	0.02
Mongolia, North Korea	Asia	0.83	0.08	2.42	-0.47
China, Hong Kong, Macao	Asia	2.07	0.37	0.07	0.33
Taiwan	Asia	1.27	0.3	1.28	0.4
Rest of South Asia	Asia	4.82	0.31	1.82	0.13
India, Maldives, Sri Lanka	Asia	4.04	0.33	0.35	0.15
Indonesia, Papua New Guinea, East Timor	Asia	0.97	0.02	0.65	0.02
Thailand	Asia	1.76	0.06	0.55	0.1
Malaysia, Singapore, Brunei	Asia	1.1	0.03	1.12	0.03
Philippines	Asia	0.49	0.08	0.36	0.1
Vietnam	Asia	1.46	0.05	0.68	0.11
Cambodia, Laos, Myanmar	Asia	1.91	0.05	0.62	0.12
Canada, Greenland	North America	0.41	0.18	2.55	0.45
United States	North America	0.35	0.34	0.35	0.84
Brazil	South America	0.83	0.03	0.27	0.02
Mexico	North America	1.26	0.12	2.64	0.26
Central America, Caribbean	North America	1.16	0.08	1.44	0.18
Chile	South America	0.35	0.18	0.64	0.08
Argentina, Falklands, Uruguay	South America	0.46	0.04	0.2	0.01
Rest South America	South America	0.94	0.02	0.28	0.03

La estimación de DALY se realizó para el mortero convencional, incluyendo las nanopartículas de TiO₂, abarcando el proceso de fabricación del material y su vida útil junto con el mantenimiento requerido. El cálculo del impacto se llevó a cabo considerando las categorías de impacto que incluyen el nanomaterial, lo que permitió definir las vías de daño para entender

realmente el tipo de afectación que se analizó, especialmente en términos de salud humana. Para ello, se utilizó una tabla de contabilidad, donde se especificó la categoría de impacto, el indicador de punto medio CFm y la unidad correspondiente. Luego se definió con qué emisiones resultantes del ACV trabajar. Con los indicadores claros, fue necesario crear una matriz, ya que los valores serían ajustados con un factor de caracterización para llevar el valor al punto medio y luego multiplicarlo por el factor de conversión para llegar finalmente a la unidad deseada, DALY. Este análisis se realizó para uno de los contaminantes debido a la compatibilidad entre los métodos. No obstante, es importante tener en cuenta que esta metodología se encuentra en desarrollo por lo que aún no es ampliamente utilizada.

3.3 Análisis de costos en el ciclo de vida (LCC)

El análisis de costos del ciclo de vida del mortero aplicado en el túnel contempla tanto la implementación inicial como el mantenimiento necesario durante los 50 años proyectados. Para esto, primero se actualizaron los presupuestos planteados para la fase de construcción en el proyecto de Medina et al. (2016). Luego, los costos de implementación se ajustaron al año 2024, considerando que la investigación original se realizó en 2016. En cuanto al mantenimiento, se presupuestó considerando el trabajo de dos cuadrillas que operarán simultáneamente desde ambos extremos del túnel, empleando técnicas manuales e hidrolavadoras, una situación factible para Colombia, donde este tipo de infraestructura es poco común. Para proyectar el mantenimiento a lo largo de 50 años, se empleó una modelación del Índice de Precios al Consumidor (IPC) para los insumos y el Salario Mínimo Legal Vigente (SMLV) para la mano de obra. Se consideraron datos de los últimos 20 años, excluyendo casos atípicos como la pandemia y la crisis de 2008, que podrían distorsionar una proyección más realista. Con esta información, se estableció una tasa de variación que ajusta la inversión necesaria a lo largo del tiempo para las labores de limpieza.

Es crucial incluir este costo, dado que la efectividad de las nanopartículas depende de su exposición directa a los rayos UV, lo cual puede verse obstaculizado por la polución y el material particulado dentro del túnel. Por ello, se considera necesario realizar mantenimiento al menos cada 5 años. Con el valor base establecido en 2024, se puede determinar la inversión inicial en valor presente; sin embargo, es esencial considerar la variación tentativa de la mano de obra y el incremento de los insumos debido a la inflación para estimar la inversión necesaria para mantener esta estructura y evaluar si sigue siendo sostenible o no.

Para dar una mejor perspectiva de los beneficios económicos que puede brindar el nanomaterial se tiene en cuenta el mercado de carbono en Colombia. De acuerdo con Climate Focus et al., (2020) esta es una plataforma que incentiva la compensación de las emisiones generadas a las diferentes entidades del país ya sean públicas o privadas, esta compensación son los esfuerzos del país para cumplir los compromisos internacionales frente al cambio climático. Las entidades que participen de este mercado tendrán varias ventajas, en primer lugar, se encuentran los incentivos económicos por la reducción de emisiones esto permite la generación de ingresos o un ahorro de impuestos gracias al mercado de los créditos de carbono. También hay beneficios en el fomento de tecnologías limpias ya que este mercado incentiva a la inversión de energía limpia, conservación de bosques, biodiversidad, mejora en la calidad de vida y un acceso a mercados internacionales ya que el cumplir con las normativas de emisiones facilita el acceso de productos del país a mercados internacionales dadas las certificaciones ambientales presentes en los diferentes lugares del mundo.

4 RESULTADOS

En este apartado se muestra el desarrollo de la metodología con los valores exactos y los procedimientos para mostrar a detalle todas las consideraciones y cálculos realizados. Es importante tener en cuenta que se realizaron dos estimaciones una primera parte es de la cuna a la puerta en donde se enfatiza en la etapa de fabricación del material y la segunda parte la fase de mantenimiento en donde se analiza el desempeño de las nanopartículas basándose en los rangos de emisiones que presenta la estructura.

4.1 Análisis del Impacto ambiental utilizando OpenConcrete

Para la primera parte es necesario establecer la unidad funcional y el alcance del análisis del ciclo de vida. En este caso para el análisis del mortero con TiO_2 se utilizó una unidad volumétrica (m^3) considerando un alcance de los impactos de la cuna a la puerta, lo cual indica los impactos ambientales desde la extracción, producción y entrega del material en el caso de estudio (Túnel de la Avenida Colombia). Se recalca que el alcance se establece de la cuna a la puerta dadas las limitaciones del software OpenConcrete, cuya base de datos se encuentra actualizada a 2021. Posteriormente se definen las cantidades requeridas de cada componente para producir 1 m^3 del mortero con las propiedades en estado fresco y endurecido necesarias para el caso de estudio. En este caso se utilizaron las cantidades previamente definidas de cemento, agregado fino, y agua planteadas por Medina et al., (2016), tal como se muestra en la Tabla 3. Similarmente, para el TiO_2 se estimó una cantidad requerida del 5% en peso del contenido de cemento, tal como lo plantea Medina et al., (2016). Por otro lado, se utilizaron los impactos ambientales planteados por Moro et al., (2020a), considerando que OpenConcrete aún no considera este tipo de adiciones.

Tabla 3 Datos de entrada modelación para la fabricación del mortero. Modificado de OpenConcrete versión 2010.

Entradas	
Componentes del mortero, kg/m^3	
Cemento	549
Piedra caliza, enterrada	0
Relleno de piedra caliza	0
Puzolanas Naturales	0
Ceniza de esquisto	0
Arcilla calcinada	0
Humo de sílice	0
Ceniza voladora	0
Escoria de alto horno	

Entradas	
Componentes del mortero, kg/m³	
Agregados finos	1421.4
Agregados gruesos	0
Superplastificante	0
Agua	324
Entrenadores de aire	0
Aceleradores de endurecimiento	0
Establecer aceleradores	0
Aditivos resistentes al agua	0
Retardadores	0
Densidad del mortero, kg/m³	2294

Además, es necesario establecer las entradas de energía para la mezcla de combustible y eficiencia del horno para la producción del cemento para tener en cuenta el proceso de fabricación del Clinker portlant, nuevamente se menciona que los porcentajes de participación de cada tipo de energía fue tomado del boletín informativo (XM S.A.E.S.P, 2023). Se recalca que la información de la eficiencia del horno toma los datos de la planta de Florida ya que las condiciones son iguales a la ciudad de Cali. Estos datos se encuentran en la Tabla 4 y Tabla 5.

Tabla 4 Datos de entrada para mezcla de combustible para horno de cemento. Modificado de OpenConcrete versión 2010.

Mezcla de combustible para horno de cemento		
	<i>Energía térmica, % por fuente</i>	
	Coal	70%
	Oil	15%
	Biomass	
Entradas	Fossil Waste	
	PetCoke	
	Natural Gas	15%
	Solid Waste	
	Liquid Waste	

Tabla 5 Datos de entrada para la eficiencia del horno. Modificado de OpenConcrete versión 2010.

Eficiencia del horno de cemento		
	Wet	10%
FL	Dry	0%
	Preheater	35%
	Precalciner	55%

De igual forma se ingresa el consumo de energía eléctrica producto del proceso de mezclado del cemento y los agregados. (XM S.A.E.S.P, 2023)

Para la realización de este ACV, también es imprescindible calcular las distancias de transporte de cada componente, ya que este será uno de los principales contribuyentes en el proceso de fabricación, dada la situación del medio de transporte actual en la ciudad de Cali. En este caso, se estima que todos los insumos necesarios para la fabricación del mortero tendrán como destino hipotético la planta concretera de Argos, ubicada en la dirección Cra31a-405, Cl. 13 #31a-233, en la ciudad de Yumbo, Valle del Cauca. Ver Figura 8.

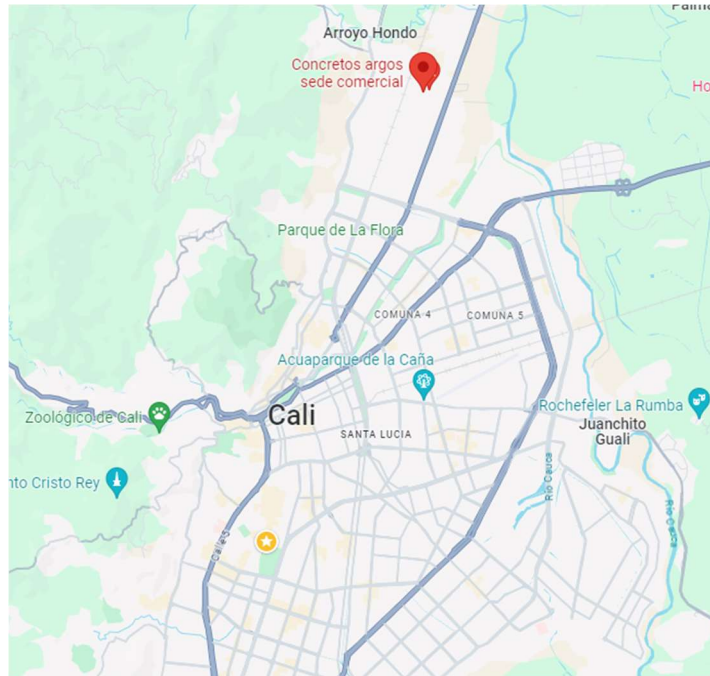


Figura 8 Ubicación geográfica de planta de concretos premezclados tomado de Google Maps.

Para la estimación de las distancias, se ha tomado como criterio un promedio de los proveedores más reconocidos en la ciudad. Esto se hace con el objetivo de obtener resultados más cercanos a la realidad, evitando extremos que puedan distorsionar el análisis. En el caso del cemento, se consideran marcas líderes como Argos, propietaria de la planta de concretos premezclados utilizada como referencia y el cemento que se selecciona para el estudio por la estandarización de calidad en el producto con base en las normas ASTM (America Standards of Testing Materials). En cuanto a los agregados, se incluyen las sedes de Cachibi, tomando en cuenta tanto las plantas ubicadas en el norte de Cali como las de Yumbo. Se adjuntan también las distancias de los aditivos potenciales, aunque no sean parte de este estudio, proporcionando el proveedor más reconocido en la ciudad para posibles análisis futuros. El resumen de esta recopilación de datos se presenta en la siguiente Tabla 6.

Tabla 6 Distancias de los insumos a la planta de concretos premezclados.

Insumo	Proveedor	Distancia (Km)	Promedio (Km)
Cemento	San marcos	42.7	30.325
	Argos	28.5	
	Cemex norte	25.7	
	Holcim	24.4	
Agregados	Cachibi planta norte	35.7	20.9
	Cachibi yumbo	22.4	
	Sika	451	
Aditivos	Master builders solutions	450	450.5

El impacto de transporte en la fabricación del nanomaterial es muy importante ya que representa un gran porcentaje en las emisiones de fabricación este impacto se tiene en cuenta en los cálculos del software; la base de datos contempla los datos de transporte por 3 medios barco, tren y camión.

Con los parámetros de entrada establecidos, se utiliza el software OpenConcrete para obtener las emisiones generadas durante la fabricación del mortero definido por Medina et al (2016) para el Túnel de la Avenida Colombia. Este software proporciona varios tipos de emisiones resultantes, que incluyen:

- Kg CO_{2eq} Dióxido de carbono equivalente, medida para expresar el potencial de calentamiento global
- Kg NO_x Óxidos de nitrógeno
- Kg SO_x Óxidos de azufre
- Kg PM₁₀ Partículas de menos de 10 µm
- Kg PM_{2.5} Partículas de menos de 2.5 µm
- Kg VOC Compuestos orgánicos volátiles
- Kg CO Monóxido de carbono
- Kg PB Plomo
- Kg Consumo de agua y energía

4.1.1 Resultados de modelación

De las emisiones indicadas previamente, en el presente análisis se hace énfasis en los NO_x, SO_x y CO. Estos componentes fueron seleccionados debido a su significativa afectación sobre la

salud humana y su clasificación como tres de los contaminantes atmosféricos más comunes en el medio ambiente urbano. Por esta razón, se da continuidad al caso de estudio de Medina et al., (2016) y se trabajó con las concentraciones de estas sustancias, para las cuales se dispone de los datos necesarios para llevar a cabo el estudio de viabilidad. Las emisiones finales se encuentran resumidas en las Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9.

Tabla 7 Emisiones del mortero estándar. Datos de salida modificados de OpenConcrete versión 2010.

Impactos por m³		
kg NO_x	kg SO_x	kg CO
2.3E-01	1.6	3.3E-01

Tabla 8 Emisiones de las nanopartículas TiO₂. Datos de salida modificados de OpenConcrete versión 2010.

Impactos por Kg de TiO₂		
kg NO_x	kg SO_x	kg CO
1.1E-02	1.3E-04	4.5E-02
(Moro et al., 2020)		

Nota. 5% De adición de nanopartículas por peso de cemento 549 Kg. Datos de salida del software OpenConcrete

Tabla 9 Emisiones para 1 m³ de mortero con adición de 5% de nanopartículas de TiO₂. Datos de salida modificados de OpenConcrete versión 2010.

Impactos del mortero con nanopartículas de TiO₂		
kg NO_x	kg SO_x	kg CO
<i>Impactos por Kg de 5% De TiO₂ para 1m³ de mortero.</i>		
3.0E-01	3.7E-03	1.2
<i>Impactos para 1m³ de mortero con 5% de TiO₂.</i>		
5.3E-01	1.6	1.6

En la Tabla 9 se presentan los resultados de la fabricación del mortero junto con las nanopartículas en un 5% de adición en peso del cemento Portland. Dado que el software solamente contempla la fabricación de concreto y/o mortero, es necesario incluir las emisiones generadas por la fabricación de las nanopartículas de TiO₂. Para ello se usan los datos de Moro et al., (2020a) quienes en su estudio sobre la influencia en el medio ambiente realizaron un análisis del ciclo de vida y obtuvieron las emisiones resultantes de la fabricación de las nanopartículas, datos en los cuales se basará la cuantificación de agentes contaminantes. Este es el impacto de la fabricación del mortero. Sin embargo, para tener un análisis integral de la implementación de este nanomaterial, es preciso en futuras investigaciones identificar las emisiones derivadas de la planta específica de donde proviene, ya que existen diversos procesos productivos.

Para la segunda fase se debe cuantificar las emisiones generadas en el túnel para ello es necesario incluir su geometría (Tabla 10). Por otro lado, la información sobre las emisiones de los gases contaminantes está resumidas en las Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13. Los valores fueron recolectados en el trabajo de Medina et al., (2016) donde se llevó a cabo una modelación basada en el sistema de Street Canyon con el software winOSPM, para determinar la concentración de agentes contaminantes. Esto depende de las condiciones de tráfico del túnel, además de su geometría.

Tabla 10 Dimensiones del Túnel de la Avenida Colombia.

Longitud (m)	833
Ancho (m)	12
Altura (m)	5.5
m ³ totales del túnel	55000

Tabla 11 Emisiones de gases NO_x (Medina et al., 2016).

C1 Sotavento	208	µg/m ³
C1 Barlovento	324	µg/m ³
C1 Paralelo a la calle	266	µg/m ³

Tabla 12 Emisiones de gases SO_x (Medina et al., 2016).

C1 Sotavento	17	µg/m ³
C1 Barlovento	26	µg/m ³
C1 Paralelo a la calle	21	µg/m ³

Tabla 13 Emisiones de gases CO (Medina et al., 2016).

C1 Sotavento	1760	µg/m ³
C1 Barlovento	2735	µg/m ³
C1 Paralelo a la calle	2247	µg/m ³

Esta información se obtiene a partir de la estimación de agentes contaminantes según lo descrito por Korc (2001) en un procedimiento implementado en el estudio del Túnel de la Avenida Colombia desarrollado por Medina et al. (2016). En particular, para este modelo se utilizaron parámetros de entrada que incluyen la concentración de los gases indicados previamente, los cuales están en función de factores como el número de vehículos por hora, la aceleración, las dimensiones del túnel y el tiempo de propagación. Estas emisiones pueden generarse tanto por sotavento como por barlovento, y se promedian según el modelo utilizado para las estimaciones. Con base en los datos proporcionados por el estudio del Túnel, se recopila la información necesaria para estimar

las emisiones en diferentes franjas de tiempo: 1 hora, 1 día y 1 año información recopilada en la Tabla 14 en donde también se incluyen los valores reducidos gracias a las nanopartículas de TiO₂.

Tabla 14 Emisiones y Reducciones de los gases generados por el uso del túnel basado en los parámetros de investigación de Medina et al., (2016).

Parámetros Para Degradar	kg NOX	kg SOX	kg CO
Estimación de emisiones por uso del túnel en 1 h	0.01	0.00	0.12
Estimación de emisiones por uso del túnel en 1 d	0.23	0.02	1.98
Estimación de emisiones por uso del túnel en 1 año	84.27	6.65	711.85
Reducción de las emisiones generadas en 1 hora	0.01	0.00	0.06
Reducción de las emisiones generadas en 1 día	0.11	0.01	0.97
Reducción de las emisiones generadas en 1 año	41.29	3.26	348.81

En la Tabla 15 se presentan los periodos de tiempo considerados para el análisis, teniendo en cuenta los parámetros de entrada establecidos. Para el caso de estudio, se contempla la simulación con un flujo de 5000 vehículos por hora. Sin embargo, es importante destacar que esta situación no es representativa durante todas las horas del día (24 horas), dado que existen periodos menos críticos en los que el flujo de vehículos puede ser incluso nulo, especialmente durante el horario nocturno. Por consiguiente, se determina que el estudio debe realizarse durante una franja horaria más precisa, que refleje de manera más efectiva la situación habitual en la ciudad de Santiago de Cali. En este sentido, se establece que el día de estudio constará de 16 horas, abarcando desde las 6:00 a.m. hasta las 10:00 p.m., lo cual refleja de manera más precisa el flujo de vehículos normal en la ciudad mencionada.

Tabla 15 Tiempo de análisis para las emisiones.

Horas	1
Día (Horas)	16
Año (Horas)	5760

En el capítulo 1 de la resolución 2254 se establecen los niveles máximos permisibles de contaminantes en el aire. En algunos casos, estos límites se expresan en términos de concentraciones máximas permitidas por horas, días o años. Es importante tener en cuenta que estos límites están establecidos en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), una unidad de medida muy baja debido a la alta peligrosidad de estos gases para la salud humana (Tabla 16).

Tabla 16 Niveles máximos de exposición a contaminantes atmosféricos Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, (2017).

Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
PM ₁₀	50	Anual
	100	24 horas
PM _{2.5}	25	Anual

Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
SO ₂	50	24 horas
	50	24 horas
	100	1 hora
NO ₂	60	Anual
	200	1 hora
O ₃	100	8 horas
CO	5000	8 horas
	35000	1 hora

Con el análisis de horas de la Tabla 15 es posible estimar las emisiones durante los períodos de tiempo indicados y verificar en qué medida exceden los límites establecidos para la salud humana. Dichos límites están establecidos en la resolución 2254 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, (2017a), la cual establece normativas para la calidad del aire ambiente y otras disposiciones relacionadas. Esta resolución se fundamenta en los artículos 79 y 80 de la Constitución Política, que consagran el derecho colectivo a disfrutar de un ambiente sano y el deber del Estado de proteger los recursos naturales para garantizar un desarrollo sostenible, la conservación del ambiente, las especies y el adecuado aprovechamiento de los recursos naturales.

En la Tabla 17 se tienen en primer lugar los límites de los gases obtenidos de la normativa colombiana, en la segunda sección están los datos de emisión calculados con los valores del estudio de caso y el análisis de horarios establecidos anteriormente. Finalmente, el cálculo de influencia de las nanopartículas se mide con el porcentaje de reducción obtenido en el caso de estudio es decir del 49% con estos datos se puede establecer comparaciones para verificar si el túnel está bajo la normativa. Cabe recalcar que las condiciones bajo las cuales se están haciendo las estimaciones son las mismas con las que experimento Medina et al., (2016) mediante la exposición de rayos UV.

Tabla 17 Emisiones de gases vs Límites permitidos para la salud humana.

Parámetros Para Degradar	Efectividad en UG/M3		
	kg NOX	kg SOX	kg CO
Limite 1H	200	100	35,000
Limite 1Dia		50	5,000
Limite 1 Año	40	63	
Emisión 1H	266	21	2247
Emisión 1D		336	35,952
Emisión 1Año	1,532,160	120,960	
Influencia de TiO ₂ 1h	136	11	1146
Influencia de TiO ₂ 1d		171	18336
Influencia de TiO ₂ 1año	781,402	61,690	

De acuerdo con los resultados calculados y presentados en la Tabla 17 se logran estimar los valores que pueden reducirse con las adicionales que se estudiaron en el caso de estudio del túnel de la avenida Colombia, con base en esto se puede observar que, durante una hora de exposición, el túnel cumple con la mayoría de los parámetros recomendados, a excepción de los gases NO_x , que sobrepasan el límite permitido en un 130%. Sin embargo, en la franja de un día, se observa un incremento significativo en los contaminantes, superando ampliamente los límites seguros establecidos por la resolución. En el período de un año, los resultados se desfazan considerablemente debido a la acumulación de contaminación en el túnel.

Con la influencia de las nanopartículas la remoción fotocatalítica de gases contaminantes por el uso de estas, la situación mejora sustancialmente. Recordando el estudio de Medina et al., (2016) en el cual se encuentra que con un 5% de adición de TiO_2 se logra una reducción de los contaminantes de hasta el 49%, se recuerda que este trabajo desarrollo una investigación de laboratorio donde se evaluó la remoción fotocatalítica de Rodamina B utilizando el mortero con 5% de TiO_2 , este es un tipo de ensayo el cual se ha convertido en un estándar internacional por la similitud de la estructura química de la RhN con los gases contaminantes, se realiza este ensayo utilizando réplicas de tres muestras. Adicionalmente, para la estimación de la capacidad de remoción de CO , NO_x y SO_x en el Túnel, se hizo una modelación considerando las condiciones ambientales y geométricas en el Software WinOSPM desarrollado en Dinamarca, el cual ha sido implementado en condiciones similares. Con este respaldo y con los cálculos presentados anteriormente se tiene que en una hora, las emisiones de NO_x bajan de $266 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $136 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Aunque en el caso de un día todavía hay un desfase en SO_x y CO , con la influencia de las nanopartículas no se logra llegar a las regulaciones sin embargo con la influencia de las nanopartículas se acercan a la norma llegando a registrar $171 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y sobrepasando en un 342% el límite establecido. Sin embargo, se debe tener presente que la situación inicial fue del 672% es importante reconocer la importancia que tiene mantener estos niveles controlados ya que existen varias afectaciones, en primer lugar y como ya se ha definido que estos gases estén sobrepasando los niveles seguros causan intoxicación y síntomas que afectan a personas con enfermedades como el asma, se puede incurrir también en sanciones administrativas para la entidad encargada del túnel, en este contexto se requieren medidas de corrección inmediatas y supervisión continua para asegurar que las correcciones mantengan los valores dentro de los límites permitidos, en conclusión toda esta situación traerá diferentes problemas y gran responsabilidad para la entidad

encargada ya que es posible que las autoridades pueden ordenar el cierre temporal o definitivo del túnel hasta dar solución a los problemas, todo esto en el marco normativo establecido en la resolución 2254 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, (2017)

En este contexto el porcentaje de reducción es notable y llama la atención, ya que, si bien el caso de estudio logró una reducción del 49% de los contaminantes con la adición de nanopartículas, existen registros que demuestran reducciones aún mayores, llegando hasta un 80%. Si se realizan diferentes pruebas en laboratorio y se consigue una reducción mayor por ejemplo del 85%, se podría mantener el túnel dentro de los límites establecidos durante un día, una estimación interesante que destaca la efectividad de los nanomateriales en la reducción de la contaminación. Estos hallazgos son importantes para futuras investigaciones que busquen definir la viabilidad de los nanomateriales con altos índices de remoción de contaminantes.

Sin embargo, la situación cambia significativamente cuando se analiza el período de un año. La contaminación alcanza niveles extremadamente altos, superando el límite permitido por más de 30,000 veces en el caso de los NO_x. Estos valores reflejan la magnitud del problema y plantean la necesidad urgente de tomar medidas adicionales para abordar la contaminación en el túnel. Aunque los nanomateriales ofrecen una ayuda significativa, es fundamental que exista una iniciativa global para promover el desarrollo sostenible y mitigar los impactos ambientales negativos. Esta situación resalta la importancia de considerar múltiples enfoques y soluciones integrales para garantizar la calidad del aire y proteger la salud humana a largo plazo.

Los resultados anteriormente expuestos muestran las emisiones en las cuales está enfocado el caso de estudio (NO_x, SO_x y CO). Se seleccionan estas 3 emisiones ya que se requiere hacer el análisis del nanomaterial en conjunto con las nanopartículas, el presente estudio se basa en el trabajo de Moro et al., (2020) y de las emisiones generadas las que coinciden para hacer el cálculo de las emisiones totales son los gases NO_x, SO_x y CO es importante mencionar que el estudio con las nanopartículas de TiO₂ es novedosa en el campo de investigación por lo tanto conseguir información detallada y que sea aplicable en el campo de estudio es difícil dada la escasa información disponible, por otra parte estos son los principales gases contaminantes derivados de la quema de combustibles fósiles en los motores de los vehículos convencionales.

En el análisis anual, los límites no se cumplen en ninguno de los casos. Sin embargo, sigue abierta la posibilidad de lograrlo mediante el estudio de la eficiencia de las nanopartículas y

aumentando su presencia para aprovechar sus efectos beneficiosos sobre la salud humana. Espacios como un túnel, que son objeto de una gran contaminación según se evidenció en los cálculos mostrados, superan en algunos casos ampliamente el límite permitido. Si tomamos en cuenta este factor, por supuesto que se hace viable la implementación de este tipo de nanotecnología en las estructuras para mejorar la calidad de vida de las personas que hacen uso del túnel.

A continuación, se presenta una estimación del comportamiento del túnel y sus emisiones a lo largo de los 50 años de vida útil de la estructura. Es importante tener en cuenta que la vida promedio de una estructura de esta envergadura suele oscilar entre 50 y 100 años, y para este caso específico se ha considerado una durabilidad de 50 años. Los impactos ambientales de la construcción de esta obra para mejorar la calidad del aire son fundamentales en este punto; ya que es aquí en donde se puede determinar su viabilidad. Con los datos totales de reducción de emisiones en 50 años, se busca estimar una compensación de la fabricación en años. Con los resultados de la Tabla 9 se conocen las emisiones de producir 1 m³ para el concreto con nanopartículas de TiO₂ y como se ha descrito anteriormente el área de aplicación será en las paredes y cubierta del túnel, por lo tanto se calcula que son necesarios 308.2 m³ para realizar la actividad; multiplicando las emisiones que están en términos de kg/m³ se podrán conseguir los kilogramos totales que corresponden a la fabricación del nanomaterial y como ya se calcularon las emisiones proyectadas a 50 años; con el porcentaje de efectividad definido del 49% es posible conocer cuántos Kg serán reducidos en este tiempo

Analizando los datos presentados en la Tabla 18 los gases NO_x y CO se compensan en menos de 5 años de uso de la estructura, representando el 57% de las emisiones totales de la implementación. Sin embargo, se tienen las emisiones de SO_x, las cuales se compensan en 148 años, un tiempo que excede los límites previsibles, aunque no está muy alejado del tiempo de vida de la estructura.

Tabla 18 Emisiones totales durante la vida útil estimada del mortero en el Túnel (50 años).

Parámetros	kg NOX	kg SOX	kg CO
Emisiones de Fabricación	163	480	479
Emisiones del uso del túnel en 1 Año	84	7	712
Emisiones del uso del túnel en 50 Años	4,213	333	35,592
Emisiones Reducidas en 50 Años	2,065	163	17,440
Tiempo de compensación en años	3.96	147.22	1.37

Es importante destacar que esta demora en la compensación se debe principalmente a que las emisiones de uso del túnel en términos de SO_x son relativamente bajas en comparación con las otras emisiones ya que para fabricar el nanomaterial se emiten 480 Kg de gases SO_x y durante 50 años los gases que emite el túnel son de 333Kg por lo tanto las que las nanopartículas son capaces de reducir son 163Kg ambos valores son inferiores por lo tanto son más difíciles de compensar. No obstante, en este punto sería interesante añadir más impactos ambientales al caso de estudio, como los demás agentes contaminantes capaces de degradar las nanopartículas. Esta sería una consideración adicional para evaluar si la implementación del material compensa con las emisiones iniciales de los gases mencionados.

En este caso de estudio, se ha puesto foco en los tres tipos de componentes más peligrosos y abundantes en los impactos al medio ambiente y la salud humana. Sin embargo, es una variable que se podría tener en cuenta para su aplicación futura y para investigaciones posteriores. Para más detalles de la modelación con OpenConcrete ver Anexo A

4.2 Impactos a la salud humana utilizando RECIPE

Como se indicó en la metodología, para la estimación de los impactos mediante RECIPE se establece el enfoque de investigación descrito en la Figura 7. En este enfoque se destacan las categorías de impacto en material particulado, formación de ozono, radiación ionizante, toxicidad humana cancerígena, toxicidad humana no cancerígena, calentamiento global y uso de agua. A las anteriores categorías de impacto se asocian aumento en las enfermedades respiratorias, aumento en varios tipos de cáncer, aumento de otras enfermedades y aumento en la desnutrición. Con el enfoque definido se verifica la compatibilidad entre los impactos ambientales obtenidos en el ACV mediante OpenConcrete y los impactos en la salud humana planteados por RECIPE. En la Tabla 19 se puede apreciar esta verificación considerando sus unidades de medida. Se destacan los kg GHG (CO₂-eq), Kg NO_x, kg PM_{2.5} y kg agua consumida. Se realiza el análisis para los gases NO_x que son los gases compatibles y con los que se trabajaron el ACV.

Tabla 19 Compatibilidad OpenConcrete y RECIPE (Manual de la metodología RIVM, 2017).

Componentes	Categoría de impacto	RECIPE-Salud humana	
		Indicador CFm	Unidad
kg GHG (CO ₂ -eq)	Cambio climático	Potencial de calentamiento Global	kg CO ₂ eq al aire
kg NO _x	Formación fotoquímica de ozono	Potencial de formación fotoquímica de ozono	kg de NO _x al aire

Componentes	Categoría de impacto	RECIPE-Salud humana	
		Indicador CFm	Unidad
kg PM _{2.5}	Formación de materia particulada fina	Potencial de formación de materia particulada fina	kg PM _{2.5} al aire
kg Pb	Toxicidad en humanos (cáncer)	Potencial de Toxicidad en humanos (cáncer)	kg 1,4-DCB al aire
kg Agua consumida	Uso del agua	Potencial de consumo del agua	m ³ de agua consumida

En la Tabla 20 se presenta un resumen de las emisiones generadas durante la fabricación del nanomaterial y el mortero estándar que pueden tener un impacto en la salud humana.

Tabla 20 Resumen de emisiones de mortero, datos de salida OpenConcrete 2010.

Mezcla	kg GHG (CO ₂ -eq)	kg NO _X	kg SO _X	kg PM ₁₀	kg PM _{2.5}	kg VOC	kg CO	kg Pb
Mortero Estándar	5.2E+02	2.3E-01	1.6E+00	3.9E-01	3.3E-01	2.8E-03	3.3E-01	3.0E-02
Mortero + 5% TiO ₂	5.9E+02	5.3E-01	1.6E+00	3.9E-01	3.3E-01	2.8E-03	1.6E+00	3.0E-02

Sin embargo, es necesario transformar estos datos a Años de Vida Ajustados por Discapacidad (DALY) utilizando la siguiente (1)

$$CFe_{x,a} = CFm_x \times F_M \rightarrow_{E,a} \quad (1)$$

En donde CFm es el valor del punto medio y FM el factor de punto medio final, ambos estimados en las tablas del manual de la metodología (Manual de la metodología RIVM, 2017). Simplificando el procedimiento para llegar al valor de CFe o punto final en DALY primero se establece el enfoque de trabajo, después se valida la compatibilidad entre los sistemas de trabajo OpenConcrete y RECIPE en la Tabla 19, se tiene una entrada y esta es la unidad que se va a convertir, para el caso de estudio Kg NO_X el cual está dentro de la categoría de impacto de formación fotoquímica de ozono y es compatible dentro de la metodología como potencial de formación fotoquímica de ozono y tiene las mismas unidades. Después se debe obtener el valor CFm de punto medio mediante el factor de categorización obtenido de la Tabla 2 para el caso de los gases NO_X el factor es de 0.94 para América del sur; obteniendo así el valor CFm de punto medio equivalente, finalmente se debe calcular el valor de punto medio final (Fm) multiplicando el valor CFm punto medio equivalente por el factor de la Tabla 21 para gases NO_X con valor de 9.1×10^{-7} con unidades expresadas en año/Kg NO_X equivalentes y así conseguir el valor CFe punto final en DALY.

Tabla 21 Factor de punto medio a punto final modificado de (Manual de la metodología RIVM, 2017).

Factores de punto medio a punto final	Unidad	I	H	E
Impacto en salud humana				
cambio climático	año/kg de CO2 al aire	8.1E-08	9.3E-07	1.3E-05
agotamiento de la capa de ozono	año/kg de CFC11 al aire	2.4E-04	5.3E-04	1.3E-03
radiación ionizante	año//kBq de Co-60 al aire	6.8E-09	8.5E-09	1.4E-08
formación de partículas finas	año/kg de PM2,5 al aire	6.3E-04	6.3E-04	6.3E-04
formación de ozono fotoquímico	año/kg de NOx al aire	9.1E-07	9.1E-07	9.1E-07
toxicidad cancerígena	año/kg de 1,4-DCB al aire	3.3E-06	3.3E-06	3.3E-06
toxicidad no cancerígena	año/kg de 1,4-DCB al aire	6.7E-09	6.7E-09	6.7E-09
uso del agua	año/m3 de agua	3.1E-06	2.2E-06	2.2E-06
Calidad del ecosistema: terrestre				
cambio climático	Especie. año/kg CO2 al aire	5.3E-10	2.8E-09	2.5E-08
formación de ozono fotoquímico	Especie. Año/kg NOx al aire	1.3E-07	1.3E-07	1.3E-07
acidificación	Especie. Año/kg SO2 al aire	2.1E-07	2.1E-07	2.1E-07
toxicidad	Especie. Año/kg 1,4- DCB al suelo industrial	5.4E-08	5.4E-08	5.4E-08
uso del agua	Especie. Año/m3 agua consumida	0	1.4E-08	1.4E-08
uso de la tierra	Especie/m2 tierra de cultivo anual	8.9E-09	8.9E-09	8.9E-09
Calidad del ecosistema: agua dulce				
cambio climático	Especie. Año/kg CO2	1.5E-14	7.7E-14	6.8E-13
eutrofización	Especie. Año/kg P al agua dulce	6.1E-07	6.1E-07	6.1E-07
toxicidad	Especie. Año/kg 1,4- DCB al agua dulce	7.0E-10	7.0E-10	7.0E-10
uso del agua	Especie. Año/m3 agua consumida	6.0E-13	6.0E-13	6.0E-13
Calidad del ecosistema: marino				
toxicidad	Especie. Año/kg 1,4- DCB	1.1E-10	1.1E-10	1.1E-10
eutrofización	Especie. Año/kg N al agua marina	1.7E-09	1.7E-09	1.7E-09
Escasez de recursos				
minerales	US2013 \$/kg Cu	0.16	0.23	0.23
fósiles	US2013 \$/kg petróleo crudo	0.46	0.46	0.46
	US2013 \$/kg carbón duro	0.03	0.03	0.03
	US2013 \$/Nm3 gas natural	0.30	0.30	0.30

En las Tabla 22 y Tabla 23 se presentan los resultados para todos los componentes, sin embargo, el análisis se centrará principalmente en los gases NO_x. Esto se debe a que, de todos los componentes compatibles con la metodología, los gases NO_x son uno de los tres que se están estudiando en este caso específico. Además, se incluye una estimación de la cantidad de años de vida recuperados en un período de 50 años como resultado de la reducción de este componente.

Esta estimación es crucial para verificar la efectividad de las nanopartículas en la mejora de la salud humana y resaltar el impacto positivo que pueden tener en términos de salud pública a lo largo del tiempo.

Tabla 22 Estimación de DAYLY mortero estándar, datos de salida RECIPE.

Categoría de impacto	Unidad Open Concrete	Valor Open Concrete	Factor de caracterización	Unidad Punto Medio (ReCiPe)	Valor CFm Punto medio	Unidad de Fm (factor de punto medio a final)	Valor Fm	Cfe (Punto Final en DALY)
Cambio Climático	kg GHG (CO2 eq)	522.25	1.00	kg CO2 eq.	522.25	DALY/kg CO2 eq.	1.25E-05	6.53E-03
Formación de materia particulada fina	kg PM2.5	0.33	0.19	kg PM2.5 eq.	0.06	DALY/kg PM2.5 eq.	6.29E-04	3.94E-05
Formación fotoquímica de ozono (smog)	kg NOX	0.23	0.94	kg NOx eq.	0.21	DALY/kg NOx eq.	9.10E-07	1.95E-07
Toxicidad en humanos (cáncer)	kg Pb	0.03	6.88	kg 1,4-DCB	0.20	DALY/kg 1,4-DCB	3.32E-06	6.79E-07
Uso del agua	kg Consumo de agua	2241.30	0.00	m3 Consumo de agua	2.24	Daly/m3 Consumo de agua	2.15E-08	4.82E-08
DALY (años de vida perdidos por enfermedad, discapacidad)								6.57E-03

Tabla 23 Estimación DALY Mortero + 5% de TiO₂. Datos de salida de RECIPE

Categoría de impacto	Unidad Open Concrete	Valor Open Concrete	Factor de caracterización	Unidad Punto Medio (ReCiPe)	Valor CFm Punto medio	Unidad de Fm (factor de punto medio a final)	Valor Fm	Cfe (Punto Final en DALY)
Cambio Climático	kg GHG (CO2 eq.)	593.62	1.00	kg CO2 eq.	593.62	DALY/kg CO2 eq.	1.25E-05	7.42E-03
Formación de materia particulada fina	kg PM2.5	0.33	0.19	kg PM2.5 eq.	0.06	DALY/kg PM2.5 eq.	6.29E-04	3.94E-05
Formación fotoquímica de ozono (smog)	kg NOX	0.53	0.94	kg NOx eq.	0.50	DALY/kg NOx eq.	9.10E-07	4.53E-07
Toxicidad en humanos (cáncer)	kg Pb	0.03	6.88	kg 1,4-DCB	0.20	DALY/kg 1,4-DCB	3.32E-06	6.79E-07
Uso del agua	kg Consumo de agua	2241.30	0.00	m3 Consumo de agua	2.24	Daly/m3 Consumo de agua	2.15E-08	4.82E-08
DALY (años de vida perdidos por enfermedad, discapacidad)								7.46E-03

Finalmente, en las Tabla 24 se muestra la afectación de los gases NO_x en la salud humana, este es el valor con el que se va a realizar el análisis ya que de las 3 emisiones que se están estudiando este gas es el que resulta compatible con la metodología estudiada.

Tabla 24 Años de vida compensados por emisiones de gases NO_x. Datos de salida de RECIPE.

Categoría de impacto	Unidad Open Concrete	Valor Open Concrete	Factor de caracterización	Unidad Punto Medio (ReCiPe)	Valor CFm Punto medio	Unidad de Fm (factor de punto medio a final)	Valor Fm	Cfe (Punto Final en DALY)
Formación fotoquímica de ozono (smog)	kg NOX	2065.00	0.94	kg NOx eq.	1941.10	DALY/kg NOx eq.	9.10E-07	1.77E-03
DALY (años de vida perdidos por enfermedad, discapacidad)								1.77E-03

En este apartado también es necesario saber cuál es la ventaja que ofrecen las nanopartículas, teniendo en cuenta que esta información proviene de las emisiones generadas se puede establecer un parámetro de entrada con las emisiones que lograron reducirse de gases NO_x por el uso de las nanopartículas en los 50 años proyectados en la Tabla 18 se toma el valor de 2.065Kg de NO_x en el periodo de tiempo mencionado y realizando la transformación presentada en la Tabla 24 se obtiene que estos kilogramos de gases degradados corresponden a 1.77×10^{-3} años.

Para revisar los cambios con la influencia de las nanopartículas se comparan los resultados de producir un mortero estándar, mortero con adición de nanopartículas de TiO₂ y el potencial de recuperación de años por emisiones reducidas, los resultados se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25 Potencial de recuperación de la salud humana con la utilización del mortero con TiO₂.

Factor	Unidad DALY			
	Años	Meses	días	Horas
Mortero Estándar	2.0E-07	2.3E-06	7.0E-05	1.7E-03
Mortero + 5% TiO ₂	4.5E-07	5.4E-06	1.6E-04	3.9E-03
Potencial de Recuperación de Años por Emisiones Reducidas	1.8E-03	2.1E-02	6.4E-01	1.5E+01

La baja ponderación de este factor era de esperarse, dado que la fabricación de materiales de construcción, si bien afecta significativamente al medio ambiente, no suele ser directamente responsable de enfermedades que causen la muerte a la población. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el uso de ciertos tipos de infraestructura puede tener un impacto considerable. Un ejemplo claro de esto es el uso del Túnel, que a lo largo de 50 años podría generar un ahorro significativo de tiempo, incluso aunque pueda parecer poco en comparación con el impacto de la fabricación del mortero y las nanopartículas.

El impacto de la adición de nanopartículas es notablemente alto cuando se compara con el mortero estar ya que se aumenta 2.32 veces. Sin embargo, a largo plazo, los beneficios son mucho mayores en la Tabla 25 se transforman los años a horas para tener una mejor noción del cambio; si se hace la relación de las horas que lograron recuperarse respecto a las horas que se pierden por la implementación del nanomaterial se obtiene una ventaja favorable de 3.895.83 veces más es decir que esta es la escala de horas que pueden recuperarse con la implementación de las nanopartículas este favorece de sobremanera y es punto muy grande a tener en cuenta. Es importante destacar que, dado el alcance del estudio, solo se ha analizado el impacto en NO_x, pero es probable que, si se incluyen los demás componentes, se obtengan resultados aún más favorables sobre la aplicación de este material.

4.3 Análisis de Costos en el Ciclo de Vida (ACC)

Para la estimación de costos del proyecto, se tomó como base el Análisis de Precios Unitario (APU) presentado por Medina et al., (2016), el cual contempló los costos de implementación de los insumos necesarios para la ejecución, junto con la mano de obra. Adicionalmente, se realizaron algunas modificaciones que se consideraron pertinentes y que se expondrán en la descripción de cada APU.

4.3.1 83Valoración costos de construcción actualización de precios 2024

Dado que el APU base presenta precios de insumos y mano de obra del 2016, se procedió a realizar una actualización utilizando los precios de mercado actuales (2024). Para este propósito, se emplean los datos de Homecenter, una fuente ampliamente reconocida y estable en todo Colombia. En cuanto a la mano de obra, se estima en base a el listado de análisis unitarios presentado por la gobernación del valle del cauca en el año 2021 se tendrá en cuenta el cambio de los Salarios Mínimos Legales Vigentes (SLMV) establecidos.

Los perfiles necesarios para realizar este tipo de trabajos perfiles de oficial y auxiliar civil que hayan desempeñado tareas como la albañilería para trabajos como el campamento, aplicación del mortero y labores de mantenimiento; electricistas para la instalación de las luminarias y finalmente pintores para aplicar el revestimiento de las nanopartículas, en el análisis de precios unitarios se establecer cuadrillas con los perfiles mencionados según su tarea correspondiente y los costos de cada cuadrilla son actualizados estableciendo una relación entre el salario establecido por la

Republica de Colombia para el año 2021 de 1.014.980 millones de pesos y para el año 2024 de 1.300.000 pesos. Con este insumo se hace la actualización de los precios

Tabla 26 Presupuesto actualizado de implementación nanopartículas de TiO₂ 2024. Actualizado de Medina et al., (2016).

PRESUPUESTO 2024				
Actividad	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
PRELIMINARES				
Campamento Tabla 18 M2	UND	1	\$ 2,485,618.39	\$ 2,485,618.39
LUMINARIAS				
Luminaria, de 1294x110x113 mm para 1 lámpara fluorescente UV-A de 20 W.	UND	428	\$ 1,031,984.76	\$ 441,689,476.26
APLICACIÓN TiO₂				
Suministro e instalación de mortero 1:3	M3	308	\$ 568,000.13	\$ 175,057,638.81
APLICACIÓN TiO₂				
Revestimiento de fachadas con Dióxido de Titanio; limpieza y lijado previo del soporte de mortero seco, mano de fondo y dos manos de acabado (rendimiento: 0,275 l/m ² cada Mano).	M2	15,410	\$ 71,399.13	\$ 1,100,260,631.42
Total, Costos Directos				\$ 1,719,493,364.87

Como era de esperarse, el valor final respecto al presupuesto del año 2016 es mayor en un 79%, debido a la inflación y otros fenómenos producidos en la economía colombiana.

En este caso, se realizó un ajuste del APU original de la instalación de las luminarias que incluye la incorporación de sockets y metros de cables, materiales necesarios para llevar a cabo la instalación completa, además se incluye el costo de andamios certificados que son requeridos para realizar el trabajo en alturas ya que el túnel tiene 5.5 metros de altura por eso para ello se contempla el alquiler de torres de andamios certificados de 2 cuerpos y 1 baranda para llegar a los 5 metros requeridos en este precio se consideran rodachines para facilitar el trabajo a realizar, el valor de los andamios se toma en base al mercado actual.

4.3.2 Valorización de los costos de mantenimiento

Adicionalmente, en un análisis de costos con enfoque de ciclo de vida se debe realizar la estimación de costos del mantenimiento de la estructura, un factor importante para comprender el impacto económico a lo largo de la vida útil de la misma y considerar la inversión real que debe

realizarse. Para llevar a cabo esta actividad, es necesario tener en cuenta el contexto del alcance en Colombia. El país no cuenta con muchos túneles, como es el caso de países europeos, por lo que no dispone de maquinaria especializada para el mantenimiento de estos. Teniendo en cuenta que el caso de estudio se centra en la ciudad de Cali, donde solamente hay un túnel, una inversión en maquinaria especializada para la limpieza puede que no sea tan viable.

En este contexto, se contempla un proceso de limpieza con 2 cuadrillas realizando la labor en ambos extremos del túnel. Dado que el túnel conecta la zona norte, sur y oeste de la ciudad, no es posible inhabilitarlo durante el día. Por lo tanto, el trabajo debe realizarse de noche, en una franja horaria de 9:00 PM a 5:00 AM, cuando el tráfico es mínimo y tiene un impacto reducido en la ciudad. Cada cuadrilla está compuesta por 4 oficiales y 1 auxiliar. Los cuatro oficiales trabajan cada uno con un equipo de hidrolavado, mientras que el auxiliar se encarga de conducir el vehículo que transporta el agua y sirve de transporte para los equipos y el personal.

Para esta labor, se contempla el uso de una Hidrolavadora Industrial de Alta Presión Kärcher HDS 6/14 C, ya que es ampliamente utilizada en labores industriales de largo alcance.

En la Tabla 27 se muestra el cálculo del alquiler del equipo de hidrolavado. Se realiza de esta forma debido a que las fuentes varían mucho en la referencia del equipo y, por lo tanto, en el precio. Se establece que el precio de compra en el mercado en Colombia oscila entre los 17 y 18 millones de pesos al año 2024. Con esta información, se puede calcular el valor residual, el cual se contempla en un 15% del valor de compra. Esto se debe a que los equipos de uso industrial tienen un trabajo intensivo y, después de su vida útil, la valorización está entre el 10% y el 15%.

Tabla 27 Estimación de Costos de Alquiler Hidrolavadora Industrial de Alta Presión Kärcher HDS 6/14 C

Descripción	Valor
Valor Compra del Equipo (VC)	\$ 18,000,000.00
Valor Residual (15%)	\$ 2,700,000.00
Vida Útil	7.5 Años
Depreciación (Anual)	\$ 2,040,000.00
Ganancia Esperada Alquiler	30%
Mantenimiento (Anual 35% VC)	\$ 6,300,000.00
Costo de Uso (Energía, Transporte)	\$ 90,000.00
Alquiler Anual	\$ 34,359,000.00
Alquiler Mes	\$ 2,863,250.00
Alquiler Diario	\$ 95,441.67

La vida útil de los equipos oscila entre los 5 y 10 años, y este factor depende del tipo de mantenimiento (preventivo o correctivo), su eficiencia y su intensidad. Por ello, se establece un promedio de estos valores y se toman 7.5 años de vida útil. Con ello, se obtiene la depreciación anual, calculada con la (2):

$$\text{Depreciacion: } \frac{\text{Valor Compra} - \text{Valor Residual}}{\text{Vida Util}} \quad (2)$$

Para el mantenimiento del equipo, se asume un 35% del valor, esto con el fin de garantizar un buen estado y cubrir así las labores preventivas y correctivas, como limpiezas, cambios de aceite y los repuestos. El valor del alquiler se determina con la (3)

$$\text{Alquiler} = (\text{VC} + \text{Depreciacion} + \text{Mantenimiento} + \text{Costo de Uso}) * (1 + \% \text{Ganancia}) \quad (3)$$

Este valor se comprueba con el mercado actual se encuentran precios que rondan entre los 85.000 y 120.000 pesos colombianos, este rango de precios varia en la marca del equipo, de su potencia y de su fuente de energía ya se por combustible o por electricidad.

El rendimiento de la labor en primer lugar se mide en base al rendimiento de la Hidrolavadora, el cual oscila entre 20 y 30 m². Para la estimación del trabajo se debe tener en cuenta que la labor de trabajo en alturas reduce el rendimiento de las cuadrillas.

Para el rendimiento de la Hidrolavadora se tiene en cuenta que estos equipos pueden trabajar como máximo por 3 horas seguidas y deben reposar durante 1 hora, por lo tanto, las horas útiles con el equipo de trabajo son 6 de la jornada. Para realizar un correcto trabajo en alturas se deben hacer procesos como análisis de trabajo seguro, diligenciar permisos y por supuesto armar el andamio, esta labor conlleva por lo menos de 1 hora, en este sentido las horas de operación de la Hidrolavadora se reducen a 7 y teniendo en cuenta que en este rango de tiempo debe reposar por lo menos 1 hora se mantienen las 6 horas de trabajo continuo que puede ejercer. Para tomar en cuenta la dificultad del trabajo se tomará el rendimiento más bajo posible del equipo dando así un valor de 0.05 horas para la limpieza de 1m², para el rendimiento de la mano de obra se toma como base referencias los datos de Construdata el cual muestra rendimiento de 0.045 horas para la limpieza en 1m² se decide disminuir el rendimiento en un 10% ya que tiene más complejidad un trabajo en alturas dejando así un rendimiento final del 0.04 horas para limpiar 1m².

Con base en los metros cuadrados, el rendimiento de las cuadrillas y los equipos se calcula, que la labor tendrá una duración de aproximadamente 13 días. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 28 Rendimiento del equipo de hidrolavado.

Equipo	<i>Hidrolavadora Industrial de Alta Presión Kärcher HDS 6/14 C</i>	
Rendimiento del lavado (Hora)	25.00	m ²
Rendimiento x Dia x 8 Equipos	1,200.00	m ²
Área Que Lavar	15,410.00	m ²
Duración de Lavado	12.84	Días

El suministro de energía para los equipos se planea utilizar los puntos presentes en el Túnel, mientras que el suministro hidráulico se realizará mediante 2 carro tanques. El consumo máximo de agua para la labor durante 1 día es aproximadamente de 3.6 m³ valor que se obtiene en base a las especificaciones de la Hidrolavadora en donde se registra un consumo máximo de 600 L/h haciendo la estimación a días y realizando la conversión se obtiene el valor mencionado, esta cantidad de agua la podrá suministrar un carro tanque estándar. Con las variables calculadas, se puede presentar el APU para estimar los costos del mantenimiento.

Tabla 29 APU Mantenimiento de la superficie por medios manuales.

Limpieza mecánica de fachada con aplicación directa con agua a presión y cepillado con medios manuales					M2
DESCRIPCION	UN D	CANT .	DESP. %	PRECIO UNIT	VALOR TOTAL
MATERIALES					
<i>Agua</i>	<i>M3</i>	0.000	1%	\$ 2,944.06	\$ 0.00
<i>Protector químico Insecticida Fungicida</i>	<i>Kg</i>	0.200	5%	\$ 55,300.00	\$ 11,583.97
SUBTOTAL MATERIALES					\$11,583.97
MANO DE OBRA					
<i>Cuadrilla 1 mano obra albañilería 1 ayudante-4 ofi</i>	<i>D</i>	0.007	0%	\$ 549,896.00	\$ 3,665.97
<i>Cuadrilla 2 mano obra albañilería 1 ayudante-4 ofi</i>	<i>D</i>	0.007	0%	\$ 549,896.00	\$ 3,665.97
SUBTOTAL MANO DE OBRA					\$7,331.95
EQUIPO					
<i>Medios auxiliares</i>	<i>%</i>	2%	0%	22,675.27	\$ 453.51
<i>Hidrolavadora (8 Equipos, 4 en cada lado del tunel)</i>	<i>D</i>	0.005	0%	95,441.67	\$ 477.21
<i>Carrotanque de Agua</i>	<i>D</i>	0.0017	0%	900,000.00	\$ 1,500.00
<i>Alquiler de andamios certificados 2 cuerpos +</i>	<i>D</i>	0.007	0%	25,000.00	\$ 166.67

Limpieza mecánica de fachada con aplicación directa con agua a presión y cepillado con medios manuales					M2
DESCRIPCION	UN D	CANT .	DESP. %	PRECIO UNIT	VALOR TOTAL
<i>baranda de seguridad con rodachines</i>					
<i>Costes indirectos</i>	D	0.0017	0%	32,219.96	\$ 53.70
				SUBTOTAL EQUIPO	\$2,651.08
				COSTO DIRECTO	\$ 21,566.99

Para cuantificar los costos de implementación y mantenimiento, es necesario establecer una unidad funcional que permita comparar la diferencia entre la instalación de un mortero convencional y uno con la inclusión de nanopartículas de TiO₂. La finalidad de este objetivo es valorizar los costos de la obra y su mantenimiento, además de comparar el cambio. Por lo tanto, en primer lugar, no es necesario tener en cuenta los costos administrativos, imprevistos y utilidades, ya que estas variables no afectarán el valor final de la obra, aunque sí pueden afectar el tiempo de ejecución, que depende del contratista final, la disponibilidad de la estructura en el periodo exacto de ejecución y la planificación. Existen diversas formas de realizar la tarea, por lo que no es responsable realizar estimaciones de costos y proyecciones basadas en una única forma de ejecución, ya que puede proponerse una alternativa que no se ajuste al contexto final en campo y el estudio puede perder su sentido y su valor para trabajos futuros, como segunda premisa se debe tener en cuenta que los resultados se presentaran para el año 2024 por lo tanto no es necesario proyectar los costos del mantenimiento en 50 años ya que la valorización total del proyecto se realiza en el mencionado año.

Con este análisis en mente, es necesario expresar los costos en una unidad funcional útil en cualquier momento. Para el objeto de estudio, se están actualizando los precios al 2024, pensando en una ejecución en el presente año. Sin embargo, un proyecto de esta envergadura debe pasar por un proceso de licitación, el cual tiene sus etapas y debe seguir el marco normativo y procesos necesarios para preservar y mejorar el patrimonio existente. Por lo tanto, se decide expresar los costos en términos de SMMLV (salarios mínimos legales vigentes), una unidad que permite tener una actualización casi inmediata de los precios y facilita las proyecciones desde este punto o agiliza la toma de decisiones en la fase de prefactibilidad. Esto es crucial, ya que en la mayoría de estos proyectos se invierte una gran cantidad de esfuerzos que a menudo no son muy claros.

Ahora se tiene un caso de estudio al que se aplicó un análisis integral basado en tres criterios: medio ambiente, salud humana y costos. Esta información ya está estimada para los 50 años de vida útil de la estructura, y con la unidad elegida, los datos podrán trasladarse en el tiempo de forma mucho más sencilla. Por lo anterior, las estimaciones en SMMLV para la fase de implementación y mantenimiento se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30 Costos de implementación de mortero con nanopartículas de TiO₂ en el túnel mundialista

Estimación de Costos			
SMLV Colombia 2024		\$	1,300,000.00
	Instalación		
Descripción		(Pesos COP)	SMMLV
Campamento Tabla 18 M2		\$ 2,485,618.39	1.91
Luminaria, de 1294x110x113 mm para 1 lámpara fluorescente UV-A de 20 W.		\$ 441,689,476.26	339.76
Suministro e instalación de mortero 1:3		\$ 175,057,638.81	134.66
Revestimiento de fachadas con Dióxido de Titanio; limpieza y lijado previo del soporte de mortero seco, mano de fondo y dos manos de acabado (rendimiento: 0,275 l/m ² cada Mano).		\$ 1,100,260,631.42	846.35
			Subtotal 1322.69
	Mantenimiento		
Limpieza mecánica de fachada con aplicación directa con agua a presión y cepillado con medios manuales		\$ 332,347,385.20	255.65
			Subtotal (50 años) 1278.26
Inversión total del proyecto (SMMLV)			2600.95

Aunque no es necesario tener en cuenta los valores de administración, imprevistos y utilidades se asume un 20% del total del costo directo para dar una noción del valor final aproximado de esta implementación. Para una mejor extensión de los análisis de precios unitarios ver Anexo B.

Tabla 31 Presupuesto con AIU de la implementación de mortero con nanopartículas de TiO₂

PRESUPUESTO 2024				
Actividad	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
PRELIMINARES				
Campamento Tabla 18 M2	UND	1	\$ 2,485,618.39	\$ 2,485,618.39
LUMINARIAS				
Luminaria, de 1294x110x113 mm para 1 lámpara fluorescente UV-A de 20 W.	UND	428	\$ 1,031,984.76	\$ 441,689,476.26
APLICACIÓN TiO₂				
Suministro e instalación de mortero 1:3	M3	308	\$ 568,000.13	\$ 175,057,638.81

PRESUPUESTO 2024				
Actividad	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Revestimiento de fachadas con Dióxido de Titanio; limpieza y lijado previo del soporte de mortero seco, mano de fondo y dos manos de acabado (rendimiento: 0,275 l/m ² cada Mano).	M2	15,410	\$ 71,399.13	\$ 1,100,260,631.42
			Total, Costos Directos	\$ 1,719,493,364.87
			<i>Administración 10%</i>	\$ 171,949,336.49
			<i>Imprevistos 5%</i>	\$ 85,974,668.24
			<i>Utilidad 5%</i>	\$ 85,974,668.24
			Total, AIU	\$ 343,898,672.97
			TOTAL	\$ 2,063,392,037.85

4.3.3 Valoración de las emisiones reducidas por el mercado de carbono

Para culminar el análisis de ciclo de costos se incluye una ventaja adicional de usar este tipo de nanomateriales ya que el gobierno incentiva estas prácticas con el mercado de carbono el cual se genera por la creciente emisión de gases de efecto invernadero y es un método de respuesta del Ministerio de Ambiente. Con esta metodología se pueden adquirir beneficios por cada tonelada de CO₂ Eq que sean reducidas o removidas (Climate Focus et al., 2020).

Para estimar cuantas toneladas de CO₂ Eq pueden reducirse se transformarán las emisiones de gases NO_x y CO no se realiza el proceso para las emisiones SO_x ya que este tipo de gases no tienen influencia directa en el efecto invernadero. Para calcular las toneladas de CO₂ se toman los factores de (Bernardo & Leal, 2015) el cual presenta un cuadro con los gases de efecto invernadero y su potencial de calentamiento global en términos de CO₂ Eq; para los gases NO_x se encuentra el óxido nítrico o N₂O con un factor de 310 según la IPCC 1995 y de 298 según la IPCC 2007, para los gases CO se tiene el dióxido de carbono o CO₂ el cual tiene factor de 1 para las dos normativas.

En la Tabla 32 se muestra la transformación de los gases anteriormente mencionados los kilogramos de emisiones reducidas se toman de la Tabla 18 multiplicando por los factores descritos anteriormente para los gases de efecto invernadero se obtiene el total de CO₂ Eq.

Tabla 32 Transformación de las emisiones reducidas por las nanopartículas de TiO₂ a CO₂ Eq

Transformación de gases de efecto invernadero					
Emisiones Reducidas en 50 Años	kg NO _x	kg CO	Factor NO _x	Factor CO	Ton CO ₂ Eq
	2,065	17,440	298	1	633

Con las emisiones convertidas es posible estimar cual es el valor de estas emisiones tambien conocidas como créditos carbono, según Asocarbono, (2024) tienen un valor de 25.799,56 pesos colombianos por lo tanto la totalización de los créditos es de 16.323.041,08 millones de pesos en los próximos 50 años se recalca que este beneficio se calcula en base a las emisiones reducidas de gases NO_x y CO.

5 CONCLUSIONES

- Con el mortero con adición de nanopartículas de TiO_2 el cual tiene un potencial del 44% de reducción de emisiones es posible controlar las emisiones de gases NO_x , SO_x y CO durante 1 hora de acuerdo con el límite normativo establecido; estos resultados sugieren la viabilidad de lograr una mejora al nanomaterial buscando una mayor concentración o incluso un reemplazo parcial del cemento. Se han reportado casos en los cuales se trabajan con concentraciones de hasta el 13% sin problemas tecnológicos y se observan reducciones del 80% al 90%. Esta situación habilitaría la exposición durante 1 día, ampliando mucho más el rango de efectividad de este material y aumentando, por supuesto, su valor, ya que puede degradar otras sustancias que no han sido tenidas en cuenta en este análisis de ciclo de vida, por otra parte la implementación de este nanomaterial es compensada en 4 años para el caso de gases NO_x y CO un indicador bastante positivo y que favorece a la implementación del material por el factor ambiental.
- Un aspecto para tener en cuenta son las emisiones de fabricación; como era de esperar, la fabricación del mortero con nanopartículas de TiO_2 es mayor que la de un mortero convencional, dado que se está realizando una adición y no un reemplazo. Sin embargo, el beneficio a largo plazo no tiene punto de comparación con el mortero convencional. Es importante mencionar que el mortero logra compensar sus emisiones de fabricación con sus propiedades fotocatalíticas en apenas 4 años de uso en términos de NO_x y CO. En el caso de SO_x , no logra compensarse, pero no es debido a la falla del nanomaterial sino porque las emisiones no son tan altas en este aspecto; por lo tanto, en términos porcentuales a través del tiempo se compensaría en 147 años, un tiempo mayor al esperado de la vida útil. No obstante, no se descarta esta posibilidad, ya que esta infraestructura, aunque esté diseñada para 50 años, seguramente puede y va a resistir durante un tiempo mucho mayor. Por otra parte, no hay que olvidar que solamente se está haciendo el análisis con una parte de las emisiones que es capaz de reducir las nanopartículas; por lo tanto, se tiene un nivel mucho más alto de eficiencia y ventajas del uso de este tipo de elementos.

- En términos de salud humana (DALY), el mortero con nanopartículas de TiO_2 tiene una mayor afectación que el mortero convencional, aproximadamente un 43% más. Sin embargo, el beneficio evaluado en las reducciones de gases NO_x logra superar ampliamente esta afectación. Se realizó una estimación y resulta ser 3.895.83 veces más beneficioso. Este factor se considera extremadamente importante, ya que se está hablando de tiempo de vida que puede recuperarse, aunque sea en horas, puede mejorar notablemente la salud de las personas. Estamos hablando de sustancias extremadamente peligrosas que generan enfermedades en su mayoría terminales y de alto riesgo, es de tener en cuenta que existe una norma que regula su exposición hasta por hora, dado que puede significar la muerte. Este factor tiene una influencia directa sobre el aspecto económico, ya que mejorar el impacto en la salud humana en la proporción anteriormente expuesta significa reducir el índice de enfermedades. Esto se traduce en una reducción de los costosos tratamientos necesarios para estas enfermedades, que en ocasiones son terminales y requieren inversiones considerables para prolongar la vida. Aunque este aspecto no se pueda cuantificar con precisión, seguramente representará una disminución importante en la inversión del gobierno para tratar estas enfermedades, liberando recursos que podrían emplearse en otros fines que contribuyan a mejorar la salud de las personas.
- Aunque en el aspecto económico, la implementación de las nanopartículas supera el costo del mortero convencional. Se debe tener en cuenta que la actividad de instalación de las luminarias será una actividad que deberá realizarse en el futuro, incluso por mantenimiento para recuperar la iluminación del lugar. Con esto en mente, aunque el porcentaje pueda parecer alto inicialmente, está dentro del presupuesto de las obras de infraestructura estratégicas gubernamentales que suelen ser ejecutadas. Además, con la mejora en la calidad del aire y la salud humana, se considera altamente atractivo. Esto se debe a que solamente se está evaluando una fracción de las capacidades de las nanopartículas de TiO_2 . Este material puede degradar muchas más sustancias y se puede lograr una mayor concentración y efectividad, mejorando aún más las cifras expuestas, además hay que tener en mente los diferentes incentivos que trae degradar gases de efecto invernadero en el factor económico se recupera una fracción de los costos de implementación, bien sea para realizar una nueva inversión o para cubrir obligaciones

tributarias con el estado, todo esto sin mencionar las ventajas adicionales que trae consigo y que por supuesto benefician las oportunidades a largo plazo de las entidades que dirigen el proyecto.

En conclusión, la implementación de un mortero con adición de nanopartículas de TiO_2 puede parecer bastante costosa a primera vista, ya que representa casi el doble de la inversión de un mortero convencional. En cierta medida, esto puede generar un pensamiento negativo hacia esta implementación. Sin embargo, es de vital importancia realizar un análisis integral de esta propuesta. Aunque el factor económico pueda parecer elevado, los beneficios medioambientales y para la salud que puede traer este material son significativos. Pueden mejorar la situación en este caso de estudio y en diversas zonas de la ciudad de Cali, Colombia, y, por supuesto, del mundo.

Siguiendo el enfoque en el factor económico, esta inversión puede a su vez representar un ahorro de recursos que de otra manera deberían ser implementados para recuperar el ambiente en algunas zonas y salvaguardar la salud de sus habitantes. Actualmente nos enfrentamos a situaciones de riesgo con la fauna y flora, perdiendo cada vez más zonas verdes debido al desarrollo de las ciudades o a fenómenos medioambientales como el calentamiento global. En el aspecto de la salud humana, las enfermedades respiratorias son cada vez más comunes y requieren tratamientos sumamente costosos, que muchas personas no pueden permitirse; recurriendo así a las EPS (Entidades Promotoras de Salud) que, si bien no siempre pueden prestar el servicio por diferentes motivos, ya tiene un personal que tienen acceso a estos costosos tratamientos, representando una inversión significativa. Esto es algo que debemos tener en cuenta, ya que, aunque en este punto se hable de números y presupuestos, también se están tocando aspectos muy importantes como la "calidad de vida" y la "preservación del ecosistema", factores que no deberían ser negociables y deben recibir nuestra máxima atención.

Por lo tanto, se considera viable la implementación de este nanomaterial, ya que existe la posibilidad de perfeccionar esta propuesta y lograr un nuevo alcance con un porcentaje de adición mayor, aumentando así el porcentaje de reducción fortaleciendo las ventajas del nanomaterial.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amor, F., Baudys, M., Racova, Z., Scheinherrová, L., Ingrisova, L., & Hajek, P. (2022). Contribution of TiO₂ and ZnO nanoparticles to the hydration of Portland cement and photocatalytic properties of High Performance Concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00965>
- Asocarbono. (2024, febrero 8). *Impuesto Nacional al Carbono*. fedemaderas.org.co.
- ASTM. (2017). *Standard Practice for Measuring Life-Cycle Costs of Buildings and Building Systems*. <https://doi.org/10.1520/E0917-17>
- Atsdr. (2002). *ATSDR Oxidos de Nitrogeno ToxFAQs Es*. www.atsdr.gov/es/
- Atsdr. (2009). *ToxFAQsTM sobre el monóxido de carbono*. www.atsdr.cdc.gov/es
- Atta-ur-Rehman, Qudoos, A., Kim, H. G., & Ryou, J. S. (2018). Influence of titanium dioxide nanoparticles on the sulfate attack upon ordinary Portland cement and slag-blended mortars. *Materials*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/ma11030356>
- Bernardo, J., & Leal, C. (2015). *Mecanismo para la mitigación voluntaria de emisiones de gases efecto invernadero para Colombia*.
- Bersch, J. D., Flores-Colen, I., Masuero, A. B., & Dal Molin, D. C. C. (2023). Photocatalytic TiO₂-Based Coatings for Mortars on Facades: A Review of Efficiency, Durability, and Sustainability. En *Buildings* (Vol. 13, Número 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/buildings13010186>
- Bohórquez, A. J., Quiroz, H. P., & Dussan, A. (2016). Propiedades estructurales y ópticas de nanoestructuras de TiO₂ depositadas por el método de deposición en baño químico para aplicaciones en Sensores UV. *Informacion Tecnologica*, 27(6), 185-192. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000600019>
- Braga, A. M., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2017). Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 162, 529-543. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.057>
- Cassar, L. (2004). *Photocatalysis of Cementitious Materials: Clean Buildings and Clean Air*. <http://advertisers.mrs.org>

- Cassar, L., Pepe, C., Tognon, G., Guerrini, G. L., & Amadelli, R. (2003). *White cement for architectural concrete, possessing photocatalytic properties*. https://www.researchgate.net/publication/228755640_White_cement_for_architectural_concrete_possessing_photocatalytic_properties
- Castro-Hoyos, A. M., Rojas Manzano, M. A., & Maury-Ramírez, A. (2022). Challenges and Opportunities of Using Titanium Dioxide Photocatalysis on Cement-Based Materials. *Coatings*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/COATINGS12070968>
- Climate Focus, Akorde, & Climate Outreach. (2020). *Ficha informativa #4. Los mercados de carbono*.
- David Escobar, J. (2019). *Caracterización del Parque Automotor de la Ciudad de Bogotá para Simulación de Calidad del Aire*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/a2ffa863-4582-49fd-b3c6-18fe855bdb2c/content>
- ECHA. (2019). *SOX (Óxidos de azufre)*. <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.028.359>
- Expansión / Datosmacro. (2024, junio). *IPC de Colombia*. <https://datosmacro.expansion.com/ipc-paises/colombia#:~:text=La%20variación%20mensual%20del%20IPC,es%20del%204%20C1%25>.
- Gopalan, A. I., Lee, J. C., Saianand, G., Lee, K. P., Sonar, P., Dharmarajan, R., Hou, Y. L., Ann, K. Y., Kannan, V., & Kim, W. J. (2020). Recent progress in the abatement of hazardous pollutants using photocatalytic TiO₂-based building materials. En *Nanomaterials* (Vol. 10, Número 9, pp. 1-50). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/nano10091854>
- ISO. (2006). *ISO 14040 Environmental management*. www.iso.org/standard/14040.html
- ISO. (2017). *Buildings and constructed assets ISO 15686-5 2017*. www.iso.org/standard/15686.html

- Khannyra, S., Luna, M., Gil, M. L. A., Addou, M., & Mosquera, M. J. (2022). Self-cleaning durability assessment of TiO₂/SiO₂ photocatalysts coated concrete: Effect of indoor and outdoor conditions on the photocatalytic activity. *Building and Environment*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108743>
- Korc, M. E., & Consultor, R. S. (2001). *Monitoreo de la calidad del aire en américa latina*. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/55453>
- Machado, E. (2022, agosto 9). *Nanotecnología al servicio de la sostenibilidad en la construcción*. <https://360enconcreto.com/blog/detalle/nanotecnologia-al-servicio-de-sostenibilidad/>.
- Manual de la metodología RIVM. (2017). *ReCiPe 2016 v1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization*. www.rivm.nl/en
- Maury, A., & de Belie, N. (2010). State of the art of TiO₂ containing cementitious materials: Self-cleaning properties. *Materiales de Construcción*, 60(298), 33-50. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.48408>
- Medina, Torres Daniel, Meza German, & Villota Ricardo. (2016). *Diseño de un sistema para generar purificación del aire y auto-limpieza en las superficies del túnel de la avenida Colombia (Cali)*. Pontificia Javeriana Cali .
- Meng, C., Dong, P., Tian, H., Cheng, T., Li, J., Liu, Y., Yang, X., Xie, M., Chen, X., & Xi, X. (2020). Photocatalytic concrete paving block reinforced by TiO₂ nanotubes for NO removal. *Journal of Materials Science*, 55(29), 14280-14291. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05048-w>
- Mesa, J. A., Fúquene, C. E., & Maury-Ramírez, A. (2021). Life cycle assessment on construction and demolition waste: A systematic literature review. En *Sustainability (Switzerland)*. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/su13147676>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s. f.). *Contaminación Atmosférica*. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/contaminacion-atmosferica/#:~:text=Los%20contaminantes%20en%20el%20aire,qu%C3%ADmicas%20presentes%20en%20el%20aire.>

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Resolución 2254*.
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=82634>
- Moro, C., Francioso, V., Schragar, M., & Velay-Lizancos, M. (2020a). TiO₂ nanoparticles influence on the environmental performance of natural and recycled mortars: A life cycle assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 84.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106430>
- Moro, C., Francioso, V., Schragar, M., & Velay-Lizancos, M. (2020b). TiO₂ nanoparticles influence on the environmental performance of natural and recycled mortars: A life cycle assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 84.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106430>
- Mosquera E., Rosas N., Debut A., & Guerrero V.H. (2015). *Síntesis y Caracterización de Nanopartículas de Dióxido de Titanio Obtenidas por el Método de Sol-Gel*.
https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/download/525/pdf#:~:text=Propiedades%20como%20la%20dureza%2C%20elasticidad,%2Dbacteriales%2C%20sensores%20y%20catalizadores.
- Nazari, A., & Riahi, S. (2010). The effect of TiO₂ nanoparticles on water permeability and thermal and mechanical properties of high strength self-compacting concrete. *Materials Science and Engineering A*, 528(2), 756-763. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.074>
- Ochoa, Y., Ortigón, Y., & Rodríguez Páez, J. E. (2010). Síntesis de TiO₂, fase anatasa, por el método sol-gel: estudio del efecto de la presencia de AcacH en el sistema. En *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º* (Vol. 52). Marzo.
- OMI. (2020). *Azufre 2020: reduciendo las emisiones de óxidos de azufre*.
[https://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Paginas/Sulphur-2020.aspx#:~:text=Los%20%C3%B3xidos%20de%20azufre%20\(SOx,y%20enfermedades%20de%20los%20pulmones.](https://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Paginas/Sulphur-2020.aspx#:~:text=Los%20%C3%B3xidos%20de%20azufre%20(SOx,y%20enfermedades%20de%20los%20pulmones.)
- Praveenkumar, T. R., Vijayalakshmi, M. M., & Meddah, M. S. (2019). Strengths and durability performances of blended cement concrete with TiO₂ nanoparticles and rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 217, 343-351.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.045>

- Rosero Berrío. (2023). *Alcaldía de Cali le pone fin a problemáticas en túnel mundialista*. Alcaldía Santiago de Cali. <https://www.cali.gov.co/bienesyservicios/publicaciones/174983/alcaldia-de-cali-le-pone-fin-a--problematicas-en-tunel-mundialista/>
- Saeli, M., Tobaldi, D. M., Rozman, N., Sever Škapin, A., Labrincha, J. A., & Pullar, R. C. (2017). Photocatalytic nano-composite architectural lime mortar for degradation of urban pollutants under solar and visible (interior) light. *Construction and Building Materials*, 152, 206-213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.167>
- Sánchez, G. (2013, mayo 16). *Cali vive una transformación urbana; el Túnel Mundialista y el Paseo de la Avenida Colombia están en servicio*. Alcaldía de Santiago de Cali.
- Semana, A. (2023, febrero 8). *Este es el mapa del empleo en el sector de la construcción*. <https://www.semana.com/especiales-multimedia/articulo/este-es-el-mapa-del-empleo-en-el-sector-de-la-construccion/202202/#:~:text=Pese%20a%20la%20pandemia%2C%20el,de%20las%20disciplinas%20m%C3%A1s%20demandadas.>
- Tsotsis, G., & Ibarra, L. (2018). *Aplicaciones de la nanotecnología en los materiales de la construcción*. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/133970/Mem%c3%b2ria_TsotsisGeorgios.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- UNAL. (2021). Nanopartículas le imprimirían más resistencia al cemento. *N.º 581*.
- Vargas Urbano, C., Andrea, M., Muñoz, O., Halil, Y., Fernández, O., Páez, R., Enrique, J., Amado, C., & Jesús, R. (2011). *Universidad del Norte*. 29(2), 186-201. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85220757005>
- Will, A., Michael, H., Wolfram, S., & Scrivener, K. (2022). *Decarbonising global construction- by the Joint Committee on the Globe Consensus*. <https://www.steelconstruct.com/>
- World Green Building Council. (2023). *Santiago de Cali, Colombia - World Green Building Council*. <https://worldgbc.org/signatory/santiago-de-cali-colombia/>
- XM S.A.E.S.P. (2023). *Boletín energético # 284 seguimiento a variables*.

Yang, L., Hakki, A., Zheng, L., Jones, M. R., Wang, F., & Macphee, D. E. (2019). Photocatalytic concrete for NOx abatement: Supported TiO₂ efficiencies and impacts. *Cement and Concrete Research*, 116, 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.002>

7 ANEXOS

Anexo A Modelación del impacto de mortero con nanopartículas de TiO₂

Inputs (blue cells)

<i>Mortar Constituents, kg/m³</i>		Enter in D3 & D4	
Manual Input	549	Clinker (kg/m ³)	549
Limestone, interground	0	Gypsum (kg/m ³)	
Limestone Filler	0	Propotion of Limestone (%)	0.00%
Natural Pozzolans		Propotion of Calcined Clay (%)	0.00%
Shale Ash	0		
Calcined Clay	0		
Silica Fume	0		
Fly Ash	0		
Blast Furnace Slag			
Fine Aggregates	1421.4		
Coarse Aggregates	0		
Superplasticizer	0		
Water	324		
Air Entrainers	0		
Hardening Accelerators	0		
Set Accelerators	0		
Water Resisting Admixtures	0		
Retarders	0		
Mortar Density, kg/m³	2294		

<i>Transportation distances for constituents</i>			
constituent	distance, truck (km)	distance, rail (km)	distance, ship (km)
Portland Cement	0	0	0
Limestone, interground	0	0	0
Limestone Filler	0	0	0
Natural Pozzolans	0	0	0
Shale Ash	0	0	0
Calcined Clay	0	0	0
Silica Fume	0	0	0
Fly Ash	0	0	0
Blast Furnace Slag	0	0	0
Fine Aggregates	20.87	0	0
Coarse Aggregates	20.87	0	0
Superplasticizer	451	0	0
Water	0	0	0
Air Entrainers	0	0	0
Hardening Accelerators	0	0	0
Set Accelerators	450.5	0	0
Water Resisting Admixtures	0	0	0
Retarders	0	0	0

Fuel Mix & Kiln Efficiency

Cement Kiln Fuel Mix (Select)	<i>Thermal Energy, % by source (default = USGS National avg, 2017)</i>	
Manual Input	Coal	Enter in D26
	Oil	Enter in D27
	Biomass	Enter in D28
	Fossil Waste	Enter in D29
	PetCoke	Enter in D30
	Natural Gas	Enter in D31
	Solid Waste	Enter in D32
	Liquid Waste	Enter in D33

Cement Kiln Efficiency* (Select)			
70%	FL	Wet	10%
15%		Dry	0%
		Preheater	35%
		Precalciner	55%

*for states that do not produce cement, US kiln efficiency avg. for cement production calculations is used

Electricity Mix

Cement** (Select)	<i>Electricity Grid, % by source (EPA 2018)</i>	
Manual Input	Coal	Enter in D38
	Oil	Enter in D39
	Natural Gas	Enter in D40
	Biomass	Enter in D41
	Nuclear	Enter in D42
	Hydroelectric	Enter in D43
	Geothermal	Enter in D44
	Solar	Enter in D45
	Wind	Enter in D46

Limestone, interground (Select)	<i>Electricity Grid, % by source (EPA 2018)</i>	
Manual Input	Coal	Enter in H38
	Oil	Enter in H39
	Natural Gas	Enter in H40
	Biomass	Enter in H41
	Nuclear	Enter in H42
	Hydroelectric	Enter in H43
	Geothermal	Enter in H44
	Solar	Enter in H45
	Wind	Enter in H46

**for states that do not produce cement, US electricity mix avg. for cement production calculations is used

Limestone Filler (Select)	<i>Electricity Grid, % by source (EPA 2018)</i>	

Natural Pozzolans (Select)	<i>Electricity Grid, % by source (EPA 2018)</i>	

Manual Input	Coal	Enter in D50
	Oil	Enter in D51
	Natural Gas	Enter in D52
	Biomass	Enter in D53
	Nuclear	Enter in D54
	Hydroelectric	Enter in D55
	Geothermal	Enter in D56
	Solar	Enter in D57
	Wind	Enter in D58

Manual Input	Coal	Enter in H50
	Oil	Enter in H51
	Natural Gas	Enter in H52
	Biomass	Enter in H53
	Nuclear	Enter in H54
	Hydroelectric	Enter in H55
	Geothermal	Enter in H56
	Solar	Enter in H57
	Wind	Enter in H58

Shale Ash (Select)		<i>Electricity Grid, % by source (EPA 2018)</i>
Manual Input	Coal	Enter in D61
	Oil	Enter in D62
	Natural Gas	Enter in D63
	Biomass	Enter in D64
	Nuclear	Enter in D65
	Hydroelectric	Enter in D66
	Geothermal	Enter in D67
	Solar	Enter in D68
	Wind	Enter in D69

Calcined Clay (Select)		<i>Electricity Grid, % by source (EPA 2018)</i>
Manual Input	Coal	Enter in H61
	Oil	Enter in H62
	Natural Gas	Enter in H63
	Biomass	Enter in H64
	Nuclear	Enter in H65
	Hydroelectric	Enter in H66
	Geothermal	Enter in H67
	Solar	Enter in H68
	Wind	Enter in H69

Silica Fume (Select)		<i>Electricity Grid, % by source (EPA 2018)</i>
Manual Input	Coal	Enter in D72
	Oil	Enter in D73
	Natural Gas	Enter in D74
	Biomass	Enter in D75
	Nuclear	Enter in D76
	Hydroelectric	Enter in D77
	Geothermal	Enter in D78
	Solar	Enter in D79
	Wind	Enter in D80

Fly Ash (Select)		<i>Electricity Grid, % by source (EPA 2018)</i>
Manual Input	Coal	Enter in H72
	Oil	Enter in H73
	Natural Gas	Enter in H74
	Biomass	Enter in H75
	Nuclear	Enter in H76
	Hydroelectric	Enter in H77
	Geothermal	Enter in H78
	Solar	Enter in H79
	Wind	Enter in H80

Blast Furnace Slag (Select)		<i>Electricity Grid, % by source (EPA 2018)</i>
------------------------------------	--	---

Fine Aggregate (Select)		<i>Electricity Grid, % by source (EPA 2018)</i>
--------------------------------	--	---

Manual Input	Coal	Enter in D83
	Oil	Enter in D84
	Natural Gas	Enter in D85
	Biomass	Enter in D86
	Nuclear	Enter in D87
	Hydroelectric	Enter in D88
	Geothermal	Enter in D89
	Solar	Enter in D90
	Wind	Enter in D91

Manual Input	Coal	Enter in H83
	Oil	Enter in H84
	Natural Gas	Enter in H85
	Biomass	Enter in H86
	Nuclear	Enter in H87
	Hydroelectric	Enter in H88
	Geothermal	Enter in H89
	Solar	Enter in H90
	Wind	Enter in H91

12%
1%
25%
1%
0%
59%
0%
1.8%
0.1%

Coarse Aggregate (Select)		<i>Electricity Grid, % by source (EPA 2018)</i>
Manual Input	Coal	Enter in D94
	Oil	Enter in D95
	Natural Gas	Enter in D96
	Biomass	Enter in D97
	Nuclear	Enter in D98
	Hydroelectric	Enter in D99
	Geothermal	Enter in D100
	Solar	Enter in D101
	Wind	Enter in D102

Superplasticizer (Select)		<i>Electricity Grid, % by source (EPA 2018)</i>
Manual Input	Coal	Enter in H94
	Oil	Enter in H95
	Natural Gas	Enter in H96
	Biomass	Enter in H97
	Nuclear	Enter in H98
	Hydroelectric	Enter in H99
	Geothermal	Enter in H100
	Solar	Enter in H101
	Wind	Enter in H102

12%
1%
25%
1%
0%
59%
0%
1.8%
0.1%

12%
1%
25%
1%
0%
59%
0%
1.8%
0.1%

Hardening Accelerators (Select)		<i>Electricity Grid, % by source (EPA 2018)</i>
Manual Input	Coal	Enter in D105
	Oil	Enter in D106
	Natural Gas	Enter in D107
	Biomass	Enter in D108
	Nuclear	Enter in D109
	Hydroelectric	Enter in D110
	Geothermal	Enter in D111
	Solar	Enter in D112
	Wind	Enter in D113

Air Entrainers (Select)		<i>Electricity Grid, % by source (EPA 2018)</i>
Manual Input	Coal	Enter in H105
	Oil	Enter in H106
	Natural Gas	Enter in H107
	Biomass	Enter in H108
	Nuclear	Enter in H109
	Hydroelectric	Enter in H110
	Geothermal	Enter in H111
	Solar	Enter in H112
	Wind	Enter in H113

Water Resisting Admixtures (Select)		<i>Electricity Grid, % by source (EPA 2018)</i>
--	--	---

Set Accelerators (Select)		<i>Electricity Grid, % by source (EPA 2018)</i>
----------------------------------	--	---

Manual Input	Coal	Enter in D116
	Oil	Enter in D117
	Natural Gas	Enter in D118
	Biomass	Enter in D119
	Nuclear	Enter in D120
	Hydroelectric	Enter in D121
	Geothermal	Enter in D122
	Solar	Enter in D123
	Wind	Enter in D124

Manual Input	Coal	Enter in H116
	Oil	Enter in H117
	Natural Gas	Enter in H118
	Biomass	Enter in H119
	Nuclear	Enter in H120
	Hydroelectric	Enter in H121
	Geothermal	Enter in H122
	Solar	Enter in H123
	Wind	Enter in H124

12%
1%
25%
1%
0%
59%
0%
1.8%
0.1%

Retarders (Select)		<i>Electricity Grid, % by source (EPA 2018)</i>
Manual Input	Coal	Enter in D127
	Oil	Enter in D128
	Natural Gas	Enter in D129
	Biomass	Enter in D130
	Nuclear	Enter in D131
	Hydroelectric	Enter in D132
	Geothermal	Enter in D133
	Solar	Enter in D134
	Wind	Enter in D135

Eficiencia de la remoción del TiO₂
Outputs (yellow cells) 49.0%

Impacts, per m3										
kg GHG (CO2-eq)	kg NOX	kg SOX	kg PM10	kg PM2.5	kg VOC	kg CO	kg Pb	kg Water Consumption	kg Water Withdrawal	MJ
5.22E+02	2.28E-01	1.55E+00	3.86E-01	3.30E-01	2.78E-03	3.28E-01	2.98E-02	2.24E+03	7.78E+03	2.417E+03

WEIGHT OF CEMENT 549 **5% TiO2 OF Weight of Mortar** 27.45 kg

Impacts, per Kg OF TiO2										
kg GHG (CO2-eq)	kg NOX	kg SOX	kg PM10	kg PM2.5	kg VOC	kg CO	kg Pb	kg Water Consumption	kg Water Withdrawal	MJ
(Moro et al., 2020b)										
2.60E+00	1.10E-02	1.34E-04				4.47E-02		6.88E-05	1.54E-04	

5% Of TiO2 for 1M3 Of Mortar

kg GHG (CO2-eq)	kg NOX	kg SOX	kg PM10	kg PM2.5	kg VOC	kg CO	kg Pb	kg Water Consumption	kg Water Withdrawal	MJ
7.14E+01	3.02E-01	3.68E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.23E+00	0.00E+00	1.89E-03	4.23E-03	0.00E+00

Impacts, per m3 Of Mortar with 5% OF TiO2

kg GHG (CO2-eq)	kg NOX	kg SOX	kg PM10	kg PM2.5	kg VOC	kg CO	kg Pb	kg Water Consumption	kg Water Withdrawal	MJ
5.94E+02	5.30E-01	1.56E+00	3.86E-01	3.30E-01	2.78E-03	1.55E+00	2.98E-02	2.24E+03	7.78E+03	2.42E+03

Área del túnel	
Longitud del Túnel	833
Ancho del Túnel	12

Altura del Túnel	5.5
M3	55000

Estimación de Reducción a través del tiempo						
Parámetros Para Degradar	kg NOX	kg SOX	kg PM10	kg PM2.5	kg VOC	kg CO
<i>Estimación Según Tesis Túnel por 1 Hora</i>	0.01	0.00				0.12
<i>Estimación Según Tesis Túnel en 1 D</i>	0.23	0.02				1.98
<i>Estimación Según Tesis Túnel en 1 Año</i>	84.27	6.65				711.85
<i>Reducción en 1 Hora Kg</i>	0.01	0.00				0.06
<i>Reducción en 1 Dia Kg</i>	0.11	0.01				0.97
<i>Reducción en 1 Año Kg</i>	41.29	3.26				348.81
Efectividad en UG/M3						
Parámetros Para Degradar	kg NOX	kg SOX	kg PM10	kg PM2.5	kg VOC	kg CO
<i>Limite 1H ug/m3</i>	200	100				35,000
<i>Limite 1Dia</i>		50				5,000
<i>Limite 1 Año ug/m3</i>	40	63				
<i>Emisión 1H</i>	266	21				2247
<i>Emisión 1D</i>		336				35,952
<i>Emisión 1Año</i>	1,532,160	120,960				
<i>Influencia de TiO2 1H</i>	136	11				1146
<i>Influencia de TiO2 1D</i>		171				18336
<i>Influencia de TiO2 1Años</i>	781,402	61,690				

Emisiones de Construcción		
Área de Aplicación	15410.00	M2
Espesor	0.02	Mts
M3	308.20	M3

TOTALIZACION DE EMISIONES DE TiO ₂						
PARAMETROS	kg NOX	kg SOX	kg PM10	kg PM2.5	kg VOC	kg CO
Emisiones de Fabricación	163	480	119	102	1	479
Emisiones del Uso en 1 Año	84	7				712
Emisiones en 50 Años	4,213	333				35,592

Emisiones Reducidas en 50 Años	2,065	163				17,440
TIEMPO DE COMPENSACION EN AÑOS	3.96	147.22				1.37

Anexo B Análisis de precios unitarios APU

Campamento Tabla 18 M²					UND
DESCRIPCION	UND	CANT.	DESP.%	PRECIO UNIT	VALOR TOTAL
MATERIALES					
BALASTRO DE RIO	M3	2	0%	\$ 47,200.00	\$ 94,400.00
"BISAGRA 3x2'" COBRE	UND	6	0%	\$ 9,450.00	\$ 56,700.00
CANDADO YALE 110-30	UND	2	0%	\$ 34,950.00	\$ 69,900.00
GANCHO P/TEJA ASB. MADERA	UND	14	0%	\$ 910.00	\$ 12,740.00
GUADUA [TACO] 2.50-3M	UND	23	0%	\$ 8,900.00	\$ 204,700.00
PUNTILLA 2 CC	LBS	4	0%	\$ 900.00	\$ 3,600.00
TABLA 1x10x300 OTOBO	UND	77	0%	\$ 9,900.00	\$ 762,300.00
TEJA ONDULIT #6	UND	14	0%	\$ 36,600.00	\$ 512,400.00
PORTACANDADO	UND	2	0%	\$ 9,700.00	\$ 19,400.00
SUBTOTAL MATERIALES					\$1,736,140.00
MANO DE OBRA					
MANO OBRA ALBANILERIA 2 AYUDANTE-1 OFI	HC	17	0%	\$ 42,068.32	\$ 715,161.38
SUBTOTAL MANO DE OBRA					\$715,161.38
EQUIPO					
VOLQUETA TRANSPORTE MAT.PETREOS 1-10KMS	M3	2	0%	\$ 13,198.85	\$ 26,397.70
HERRAMIENTA MENOR	GLB	3	0%	2,639.77	\$ 7,919.31
SUBTOTAL EQUIPO					\$34,317.01
COSTO DIRECTO					\$ 2,485,618.39

Revestimiento de fachadas con Dioxido de Titanio; limpieza y lijado previo del soporte de mortero seco, mano de fondo y dos manos de acabado (rendimiento: 0,275 l/m ² cada Mano).					M ²
DESCRIPCION	UND	CANT.	DESP.%	PRECIO UNIT	VALOR TOTAL
MATERIALES					
Pintura transpirable e hidrofugante a base de resinas acrílicas en emulsión acuosa, siloxanos, carbonato cálcico, agregados micronizados y aditivos especiales, resistente a los rayos UV, color blanco, acabado mate, textura lisa, aplicada con brocha, rodillo o pistola.	LTS	1	0%	\$ 75,535.08	\$ 59,370.57
<i>SUBTOTAL MATERIALES</i>					\$59,370.57
MANO DE OBRA					
MANO OBRA PINTURA 1 AYUDANTE-1 OF	H	0.24	0%	\$ 32,521.13	\$ 7,837.59
<i>SUBTOTAL MANO DE OBRA</i>					\$7,837.59
EQUIPO					
Medios auxiliares	%	2%	0%	67,941.57	\$ 1,358.83
Alquiler de andamios certificados 2 cuerpos + baranda de seguridad con rodachines	H	0.241	0%	3,125.00	\$ 753.13
Costes indirectos	%	3%	0%	69,300.41	\$ 2,079.01
<i>SUBTOTAL EQUIPO</i>					\$4,190.97
COSTO DIRECTO					\$ 71,399.13

Luminaria, de 1294x110x113 mm para 1 lámpara fluorescente UV-A de 20 W.					UND
DESCRIPCION	UND	CANT.	DESP.%	PRECIO UNIT	VALOR TOTAL
MATERIALES					
<i>Luminaria, de 1294x110x113 mm para 1 lámpara fluorescente T5 de 20 W, con difusor de polimetacrilato de metilo (PMMA) resistente a la radiación UV, cuerpo de poliéster reforzado con fibra de vidrio, reflector de lámina de acero galvanizado pintada en color blanco y balasto electrónico.</i>	UND	1	0%	\$ 789,946.56	\$ 789,946.56
<i>Tubo fluorescente F20D12BL de 20 W.</i>	UND	1	0%	\$ 123,314.97	\$ 123,314.97
<i>Socket T5 Htr</i>	UND	4	0%	\$ 2,900.00	\$ 11,600.00
<i>Cable 7 Hilos THHN / THWN-2 Calibre 12 AWG</i>	MTS	3	0%	\$ 2,009.00	\$ 6,027.00
<i>Material auxiliar para instalación de aparatos de iluminación.</i>	UND	1	0%	\$ 5,363.60	\$ 5,363.60
<i>SUBTOTAL MATERIALES</i>					\$936,252.13
MANO DE OBRA					
<i>MANO OBRA ING.ELECTR 3 AYUD-1 OFI-1 PROF</i>	H	0.35	0%	\$ 134,560.98	\$ 47,500.02
<i>SUBTOTAL MANO DE OBRA</i>					\$47,500.02
EQUIPO					
<i>Medios auxiliares</i>	%	2%	0%	931,412.65	\$ 18,628.25
<i>Alquiler de andamios certificados 2 cuerpos + baranda de seguridad con rodachines</i>	H	0.353	0%	3,125.00	\$ 1,103.13
<i>Costes indirectos</i>	%	3%	0%	950,040.90	\$ 28,501.23
<i>SUBTOTAL EQUIPO</i>					\$48,232.60
COSTO DIRECTO					\$ 1,031,984.76

Limpieza mecánica de fachada con aplicación directa con agua a presión y cepillado con medios manuales					M2
DESCRIPCION	UND	CANT.	DESP.%	PRECIO UNIT	VALOR TOTAL
MATERIALES					
<i>Agua</i>	<i>M3</i>	0.000	1%	\$ 2,944.06	\$ 0.00
<i>Protector químico Insecticida Fungicida</i>	<i>Kg</i>	0.200	5%	\$ 55,300.00	\$ 11,583.97
<i>SUBTOTAL MATERIALES</i>					\$11,583.97
MANO DE OBRA					
<i>CUADRILLA 1 MANO OBRA ALBANILERIA 1 AYUDANTE-4 OFI</i>	D	0.007	0%	\$ 549,896.00	\$ 3,665.97
<i>CUADRILLA 2 MANO OBRA ALBANILERIA 1 AYUDANTE-4 OFI</i>	D	0.007	0%	\$ 549,896.00	\$ 3,665.97
<i>SUBTOTAL MANO DE OBRA</i>					\$7,331.95
EQUIPO					
<i>Medios auxiliares</i>	%	2%	0%	22,675.27	\$ 453.51
<i>Hidrolavadora (8 Equipos, 4 en cada lado del tunel)</i>	D	0.005	0%	95,441.67	\$ 477.21
<i>Carrotanque de Agua</i>	D	0.0017	0%	900,000.00	\$ 1,500.00
<i>Alquiler de andamios certificados 2 cuerpos + baranda de seguridad con rodachines</i>	D	0.007	0%	25,000.00	\$ 166.67
<i>Costes indirectos</i>	D	0.0017	0%	32,219.96	\$ 53.70
<i>SUBTOTAL EQUIPO</i>					\$2,651.08
COSTO DIRECTO					\$ 21,566.99

Suministro e instalación de mortero 1:3					m ³
DESCRIPCION	UND	CANT.	DESP. %	PRECIO UNIT	VALOR TOTAL
MATERIALES					
<i>Agua</i>	<i>LT</i>	230.000	5%	\$ 4.42	\$ 1,066.49
<i>Arena Lavada</i>	<i>M3</i>	1.100	5%	\$ 83,500.00	\$ 96,442.50
<i>Cemento gris</i>	<i>Kg</i>	9.000	5%	\$ 30,900.00	\$ 292,005.00
<i>SUBTOTAL MATERIALES</i>					\$389,513.99
MANO DE OBRA					
<i>MANO OBRA ALBANILERIA 2 AYUDANTE-1 OFI</i>	D	0.400	0%	\$ 336,546.53	\$ 134,618.61
<i>SUBTOTAL MANO DE OBRA</i>					\$134,618.61
EQUIPO					
<i>Medios auxiliares</i>	%	10%	0%	22,675.27	\$ 2,267.53
<i>Alquiler de andamios certificados 2 cuerpos + baranda de seguridad con rodachines</i>	D	0.400	0%	25,000.00	\$ 10,000.00
<i>Mezcladora 1 Bulto</i>	D	0.400	0%	79,000.00	\$ 31,600.00
<i>SUBTOTAL EQUIPO</i>					\$43,867.53
COSTO DIRECTO					\$ 568,000.13