

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA**



**IDENTIFICACIÓN DE ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTALES DEL PILOTAJE  
PRE EXCAVADO, POR MEDIO DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO  
DE VIDA**

Angélica María Yory Gutiérrez

Universidad Militar Nueva Granada  
Facultad de Ingeniería  
Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los  
Recursos Naturales  
Bogotá, Colombia  
2015

# IDENTIFICACIÓN DE ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTALES DEL PILOTAJE PRE EXCAVADO, POR MEDIO DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.

## IDENTIFICATION OF ENVIRONMENTAL ASPECTS AND IMPACTS, OF PRE PILOTAGE EXCAVATED, THROUGH LIFE CYCLE ASSESSMENT METHODOLOGY

Angélica María Yory Gutiérrez  
Ingeniera Civil, Estudiante de Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales.  
Univerisdad Militar Nueva Granda  
Bogotá, Colombia  
[Angelikita0604@hotmail.com](mailto:Angelikita0604@hotmail.com)

### RESUMEN

El presente artículo, desarrolla la identificación de aspectos e impactos ambientales de una actividad predominante en la construcción de obras civiles, llamada pilotaje pre excavado. Esta labor de identificación de aspectos e impactos ambientales se realizará aplicando el concepto de huella ambiental mediante el procedimiento denominado Análisis de Ciclo de Vida ACV, el cual permite evaluar las cargas ambientales asociadas a un proceso, producto, o actividad, por medio de la identificación y cuantificación del uso y consumo de materia y energía, en todos los pasos necesarios para la realización física de lo que se está evaluando. En base a esto se realizó para el pilotaje pre excavado, mediante un estudio de caso cuyos datos son conocidos y se tienen al alcance, todo el procedimiento establecido por la metodología, obteniendo los insumos de materia y energía requeridos y su impacto ambiental asociado, llegando así al impacto generado por una unidad de actividad ejecutada. Una vez obtenidos estos resultados, se procede a establecer propuestas de reducción en diferentes insumos o actividades asociadas al proceso, que lleven a una reducción final del impacto ambiental inicialmente encontrado.

**Palabras Clave:** Análisis de ciclo de vida, pilotaje pre excavado, materia y energía, impacto ambiental.

### ABSTRACT

This article develops the identification of environmental Aspects and Impacts of a predominant activity in the construction works, called pre pilotage excavated. This job will be made applying of environmental footprint concept, through Life Cycle Assessment methodology. This methodology allows to evaluate the environmental charges of a product, process or activity, through the identification and quantification of inputs of matter and energy of the evaluated process.

According to this, through a case study with data known, was realized the process described in the methodology obtaining the necessary inputs of matter and energy and their environmental impact. When the results are obtained, the next step is to propose changes for achieve a reduction in different inputs or activities of the process, and potentially reduce the final environmental impact.

**Key Words:** Life Cycle Assessment, pre pilotage excavated, matter and energy, environmental impact.

## INTRODUCCION

Los sistemas de cimentación, cuya función principal es proporcionar el soporte necesario para resistir los esfuerzos generados por la estructura (bien sea una edificación, puente o elemento de contención entre otros), se convierten en una de las actividades de mayor relevancia dentro del desarrollo de una obra civil, esto debido a su costo en términos de tiempo, trabajo y dinero; sin embargo, por mucho tiempo, los impactos ambientales generados por los diferentes tipos de cimentación tales como pilotes con entubado o con excavación estabilizada mediante lodos bentoníticos o polímeros, se han dejado a un lado sin contemplar sus efectos negativos ni mejores metodologías de construcción. Igualmente, y debido a que este tipo de estructuras quedan literalmente “enterradas” en el terreno, dicha percepción poco interesada en mejorar el proceso constructivo, no ha presentado un mayor avance. Por lo anterior, se considera necesario realizar un análisis de ciclo de vida para este proceso buscando identificar, describir y caracterizar las entradas y salidas de cada uno de los procesos ejecutados dentro de la construcción de un sistema de cimentación profunda mediante pilotes excavados con polímeros.

A través de la Evaluación de Impacto Ambiental del Pilotaje Preexcavado, se pretende llegar a datos reales y comprobables que demuestren e identifiquen, según las categorías de impacto ambiental evaluadas, la afectación de esta actividad sobre el ecosistema.

Ahora bien, el presente estudio, se basa en la metodología de Análisis de Ciclo de vida, la cual va más allá del estudio de las actividades locales de la actividad a evaluar, y realiza el estudio de los diferentes impactos ambientales que pueda tener una actividad en todo su ciclo de vida, es decir, teniendo en cuenta no sólo la actividad en sí, sino todas las entradas tanto de materia como de energía, y todas las salidas que el hecho de su ejecución implica.

Una vez definido el impacto ambiental del pilotaje pre excavado, en sus condiciones normales de ejecución, se pretende realizar una propuesta, ya sea sobre la metodología constructiva utilizada, materia prima, recursos, etc; que genere una alternativa en la ejecución de los trabajos, en condiciones similares a las que se estudiarán en el presente documento.

Puede notarse entonces, que más allá de ser un EIA sobre una actividad específica, se propone por medio de una metodología reciente, basada en conceptos de

integralidad y funcionalidad de procedimientos, llegar a una propuesta verificable en la elaboración del pilotaje pre excavado, cuidando siempre de la calidad de los trabajos, y la seguridad brindada al usuario final.

## **1. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **1.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

A continuación se hará una descripción tanto del marco teórico necesario para abarcar el desarrollo del artículo, como de la metodología utilizada.

#### **1.1.1. Metodología**

Como ya se nombró la cimentación de una estructura es una de las fases neurálgicas de cualquier obra civil, pues de su buena ejecución dependerá en gran parte el buen funcionamiento de todo el esqueleto construido. Se pretende entonces llegar a la identificación de los aspectos e impactos ambientales de dicha actividad, que vaya mucho más allá de lo que se consigue convencionalmente, haciendo uso de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida del proceso seleccionado; para ello se enumerarán las siguientes fases del trabajo a realizar:

Revisión caso de estudio de obra existente, Obra Panoramia Park, ubicada en la ciudad de Bogotá

1. Investigación del proceso constructivo seleccionado, identificando las diferentes fases del mismo y los insumos de materia y energía requeridos para su correcta ejecución.
2. Descripción detallada de los materiales y equipos necesarios para la ejecución de la labor.
3. Análisis de inventario: El inventario de los procesos comprendidos dentro de los límites del sistema considerará las entradas y salidas de materia y energía utilizadas y generadas para cada una de las fases del proceso de ejecución del pilote, desde la explotación de la materia prima, hasta la construcción física del mismo.
4. Análisis de entradas: Para cada una de las fases del proceso se hace un estudio de todas las materias primas que requiere, y la cantidad de cada una de ellas por unidad funcional analizada (Unidad de pilote, o metro lineal de pilote, etc. Esto hace parte del trabajo.
5. Análisis de salidas: Se relacionan todas las materias primas de las entradas, con el producto asociado. A cada uno de estos productos se le asignará el tipo de contaminante generado con su unidad de medida correspondiente, encontrando a su vez el factor de emisión para cada una de ellas. Una vez encontrado esto, se relacionará cada factor con la cantidad real generada por unidad funcional del proceso.
6. Asignación de categorías de impacto: A cada una de las fases con sus correspondientes factores contaminantes, se le asignará una categoría de impacto, según la metodología utilizada.
7. Análisis de la información: Una vez hecho todo el trabajo anterior se realizará el análisis correspondiente etapa por etapa, de todo lo encontrado, llegando así a un

panorama general del impacto ambiental según esta metodología para el pilotaje pre excavado.

8. Propuesta de mejora: Obtenida la línea base, se pretende proponer ciertas mejoras al proceso constructivo, y aplicar al procedimiento nuevamente.
9. Análisis de la propuesta: Aplicando nuevamente el procedimiento antes mencionado, pero con las mejoras propuestas, se llegarán a diferentes valores de impacto que deben analizarse y con ello generar en base a evidencia científica, una mejora en el procedimiento hoy en día utilizado.

Dado que se tiene acceso al proyecto ya mencionado en el paso 1, se realizará el ejercicio con datos reales tanto de cantidades de obra, como de estudio de suelos y geotecnia del proceso constructivo, planos de ubicación, etc; de forma tal, que los datos obtenidos sean aplicables y comprobables.

### **1.1.2. Marco Teórico**

La descripción conceptual del proyecto se dividirá en dos fases, la primera, describirá el proceso constructivo a evaluar llamando Pilotaje Mediante Excavación con polímero, con el fin de contextualizar al lector en la actividad sobre la cual recaerá el proyecto realizado. Seguidamente, se describirá la metodología de Análisis de Civil de Vida (ISO 14040), definiendo de qué se trata, sus objetivos, alcance, procedimiento, etc.

### **Procedimiento técnico Pilotaje Pre – Excavado**

El pilotaje Pre excavado, es un procedimiento constructivo para la realización de cimentaciones profundas in-situ, es decir la construcción de pilotes fundidos en el sitio. Son varios los métodos constructivos dentro de la clasificación de pilotes fundidos in-situ, uno de ellos corresponde al método del actual estudio, definido como Pilotaje Pre excavado con agentes fluidos (polímeros). De manera general, el proceso consiste en realizar la excavación del pilote de acuerdo al diámetro y la profundidad descrita previamente en los cálculos y estudio de suelos y su seguido reforzamiento y relleno con concreto, atendiendo siempre todas las exigencias técnicas previamente establecidas. (Urbano, 2002)

### **ACTIVIDADES PREVIAS Y CONDICIONES GENERALES:**

- Determinación de las exigencias, especificaciones y propiedades para llevar a cabo la actividad, según las recomendaciones del especialista en geotecnia.
- Determinación de la cantidad de pilotes requeridos, su diámetro y localización de acuerdo a la estructura a soportar.
- Replanteo de los pilotes
- Realización de una estructura de soporte para el equipo a utilizar; comúnmente se realiza un relleno con un material de bajo costo y especificación, de tal manera que no exista gran asignación de recursos a un material que posteriormente va excavarse y desecharse. El material más usado como soporte es escombros, el cual en muchas ocasiones no sólo contiene residuos de demolición sino también residuos sólidos de todo tipo.
- Realización de prehuecos: Esta actividad corresponde a la realización de una excavación de poca profundidad (0.5m -1m), con un diámetro poco mayor al

diámetro del pilote, cuyo fondo es recubierto de arena. Se realiza con el fin de facilitar el inicio del proceso de excavación del pilote.

- Realización de jarrillón: Con un material impermeable se realiza un jarrillón en la zona circundante de cada pilote, con el fin de contener el polímero y permitir su recirculación.

### **MATERIALES**

- Concreto: según diseño, tamaño máximo en el agregado hasta de 32 mm. fluidez suficiente para garantizar una continuidad absoluta en su colocación.
- Acero de refuerzo: según diseño y de acuerdo a la longitud, dependen las uniones en la canasta: amarre:  $h \leq 10m$ . soldadura:  $h \geq 10m$  (al menos en uno (1) de cada dos (2) puntos de contacto).
- Camisas de acero (de entubación): acero estructural empleado: calidad Aashto m-270 (grado 36).
- Material en suspensión: la utilización de polímeros en el proceso de pilotaje, permite la estabilidad de las paredes de la excavación en terrenos inestables, dado el cumplimiento de ciertas características técnicas de sus componentes.

### **EQUIPO**

- Máquina piloteadora: Encargada de realizar la excavación de los pilotes. Son muchas las máquinas piloteadoras existentes, para el caso se analizará el procedimiento con un piloteadora tipo Kelly, sin utilización de camisa metálica de molde, solo de perforación.
- Grúa: Encargada del levantamiento y manejo de los elementos que requieran izarse, como el acero de refuerzo ya armado y figurado, y el tubo tremie para el momento de fundida del concreto.
- Tubo Tremie: Tubo de acero, preferiblemente liso, de tamaño menor al diámetro del pilote cuya función es facilitar la colocación del concreto dentro la perforación del pilote.

### **Norma ISO 14040 (Manejo Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Principios y Marco de aplicación)**

El análisis de ciclo de vida ACV, es una metodología que permite evaluar las cargas ambientales asociadas a un proceso, producto, o actividad, por medio de la identificación y cuantificación del uso y consumo de materia y energía en todos los pasos necesarios para la realización física de lo que se está evaluando. El (ACV) aborda todos los aspectos e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, es decir teniendo en cuenta toda la materia prima para su proceso, manufactura, producción, uso y disposición final.

Por definición, el análisis del ciclo de vida (ACV) es la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida. Las normas que permiten la certificación del estudio son la ISO 14040 y la ISO 14044. (Rivela, 2010)

El ACV es una técnica que busca encontrar los aspectos e impactos ambientales relevantes asociados a un producto o actividad, por medio de:

- Realización del inventario de las entradas y salidas significativas del proceso.
- Evaluación de los potenciales impactos ambientales asociados a cada una de las entradas y salidas identificadas.

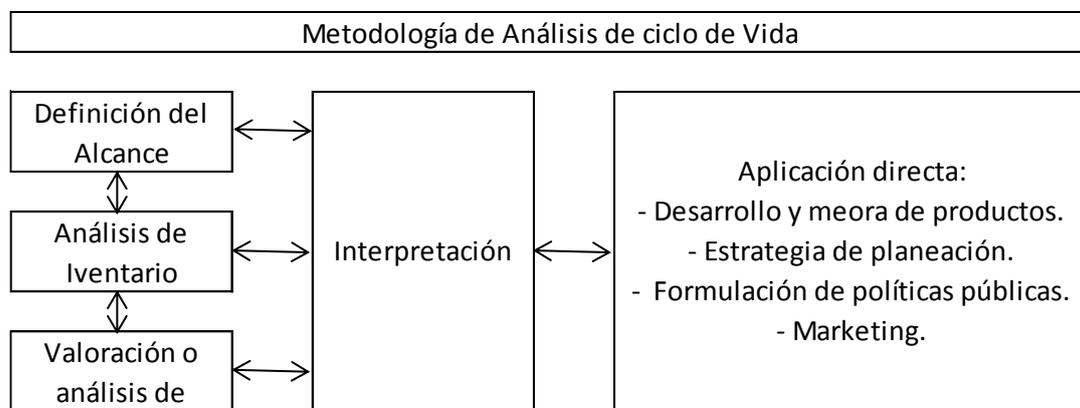
- Interpretación de resultados del análisis de inventario y los impactos asociados en cada fase del proceso, siguiendo siempre el objetivo final del estudio.

A través del uso del ACV es posible llegar a un panorama de toma de decisiones alusivas al producto, o proceso que se está evaluando, por medio de la identificación de oportunidades de mejora en alguna parte o subproceso de todo el proceso analizado, la selección e indicadores útiles y relevantes en cuanto a gestión ambiental se refiere, o sencillamente como metodología de marketing para la compañía que esté utilizando la metodología. Cabe mencionar que esta metodología debido a su relativa mediana existencia, se encuentra todavía en una fase de desarrollo y perfeccionamiento, que cada persona que lo aplica va mejorando en la medida que perfecciona el paso a paso de la misma.

Dado que el objetivo del ACV es encontrar los aspectos e impactos ambientales asociados a una actividad a lo largo de todo el proceso requerido para ser ejecutada, es necesario realizar unos límites del sistema, que consideren el nivel de detalle que quien esté usando la metodología desees. Ese límite es seleccionado en base al criterio de cada profesional, quien dependiendo de las categorías trascendentales para su estudio en particular, determina desde donde y hasta donde tomará el proceso o ciclo de vida de la actividad evaluada.

Descripción general de la metodología Análisis de Ciclo de Vida:

La metodología ACV, comprende diferentes fases, que incluyen varios de los aspectos ya mencionados con anterioridad. Las fases se representan a partir del siguiente esquema (ISO, 1997):



**Figura 1.** Esquema general metodología ACV

**Fuente:** Norma Iso 14040

## 1.2. FASE DE CAMPO

### 1.2.1. Descripción estudio de caso

#### 1.2.1.1. Ubicación de la Obra

La obra se encuentra ubicada en la ciudad de Bogotá, sobre la Av. Boyacá con Av. Suba; consiste en un conjunto residencial de dos torres de 16 y 26 pisos, plataforma de parqueaderos, club house y una extensa área de urbanismo. Cabe anotar que la

distribución en planta de las torres 1 y 2 es igual, por lo cual el análisis del pilotaje que se hace para una de ellas, es aplicable para las dos.

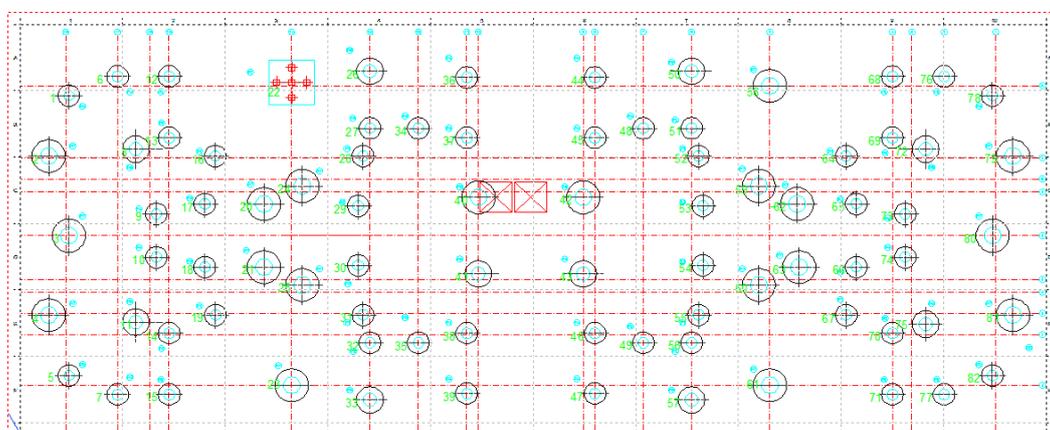


**Figura 2.** Ubicación y distribución en planta del proyecto.  
**Fuente.** Brochure del Proyecto

### 1.2.1.2. Geotecnia y cimentación

- **Descripción del suelo:** El diseño de los pilotes se realizó para arcillas blandas y limosas con contenido de materia orgánica en estratos sub-superficiales de la ciudad de Bogotá (Universidad de los Andes, 1996) de densidades totales del orden de  $1.5\text{ton/m}^3$  a  $1.8\text{ton/m}^3$ .
- **Perfil del terreno:** El terreno está compuesto en profundidad por una capa vegetal y de relleno los primeros 50cm, continuada de limos arcillosos de colores café y habano, de consistencia blanda a media en los primeros 17.0m a 20.0 m, con presencia de lentes de materia orgánica. A partir de los 20.0m de profundidad, la resistencia a la penetración se incrementa por presencia de arcillas de color gris, de consistencia firme y muy firme con presencia de lentes arenosos de densidad suelta. El nivel freático se mantuvo en un rango de 0.8m a 2.8m de profundidad durante la exploración (Estudio de suelos Hostería San Gabriel , 2013).
- **Descripción de la cimentación:** Inidentificadas las características más importantes que determinan su posible comportamiento, el Ingeniero Geotecnista, indica que deberán construirse pilotes cilíndricos de concreto reforzado, pre-excavados y fundidos in-situ de 0.50 a 1.10 m, los elementos tendrán longitudes finales entre 37.0/43.0 m medidos a partir de la losa de contrapiso de cada una de las torres. (Restrepo, 2012)

De esta forma, y bajo estrictas recomendaciones, se hace una distribución de los pilotes de la siguiente forma esquemática:



**Figura 3.** Distribución en planta de los pilotes,  
**Fuente.** Planos estructurales del proyecto

La cimentación consta de 82 pilotes de 39m de profundidad y diámetros de 65cm, 80 cm y 100cm. El detalle de la cimentación se describirá más adelante.

### 1.2.2. Secuencia de Actividades del pilotaje pre excavado

- **Excavación:** Una vez realizado el prehueco se inicia el proceso de excavación con la piloteadora. La excavación tiene una profundidad de alcance igual al tamaño de la camisa de la máquina, por lo cual la piloteadora realiza la excavación y haciendo una rotación dispone el material excavado a un costado de la perforación. El procedimiento se repite hasta llegar a la cota establecida en el diseño estructural. A medida que se realiza la excavación, debe introducirse el polímero en la perforación. Cada cierta profundidad alcanzada (5m) deberá sacarse del material excavado una muestra, para su registro y análisis, y a su vez la correspondiente anotación de los rendimientos alcanzados.
- **Figurado de acero:** El acero deberá ser de la resistencia establecida en el diseño, y cumplir con toda la normatividad vigente NSR-10. Deberá figurarse cumpliendo las especificaciones de longitud de traslapo, soldadura, separación.
- **Izado de armadura:** La armadura debe amarrarse en posición diametral con dos ganchos en su extremo superior, es decir, el extremo que servirá como cabeza del pilote. Estos ganchos son conectados con los de la grúa, y se procede a transportar la armadura hasta el sitio de excavación. La armadura deberá quedar de 20 a 50 cm por encima de la excavación.
- **Vaciado del concreto:** El proceso de fundida del concreto se realiza por medio del tubo tremie ya descrito, y una tolva puesta en su parte superior, conformando un elemento similar a un embudo. Este conjunto es insertado dentro de la excavación del pilote, y el concreto es vaciado directamente a la tolva. Deberá realizarse el proceso hasta una cota de 30cm por encima de la cota N+0.00 del pilote, de tal forma que se descabece su parte superior, eliminando el material contaminado por el fondo de la excavación. (Universidad de Oriente, 2006)

### 1.2.3. Desarrollo de la Metodología

#### 1.2.3.1. Unidad Funcional

Dadas las recomendaciones del estudio de suelos, el ingeniero calculista obtiene la distribución de pilotes presente en la Tabla 1:

**Tabla 1.** Distribución de Pilotes según resultados del diseño estructural.

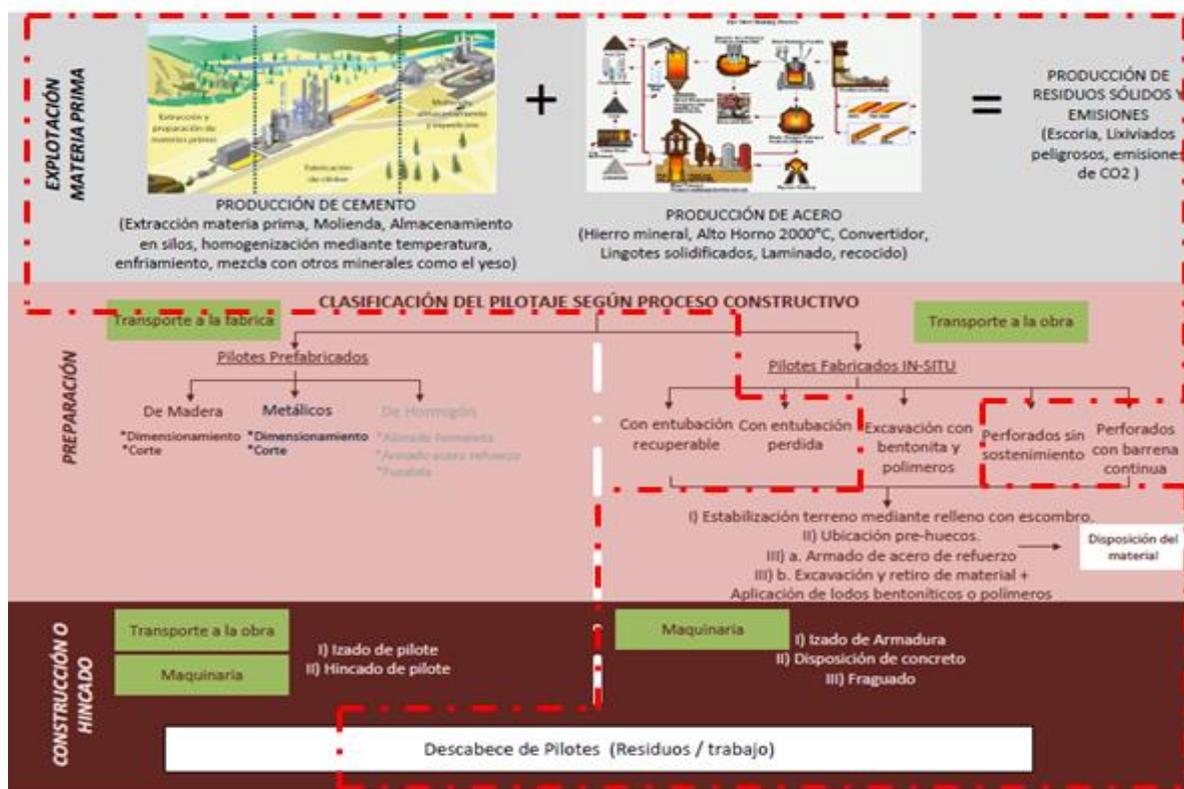
Tipo de Pilote	Diámetro (cm)	f'c (Psi)	Cantidad	Total por Diámetro
P1	65	3500	8	
P2	65	5000	40	52
P3	65	6000	4	
P4	80	5000	10	10
P5	100	3500	17	
P6	100	5000	3	20
TOTAL PILOTES			82	

**Fuente.** Elaboración propia en base al estudio de suelos

Se decidió hacerse una selección tanto de dimensiones, como de resistencia del concreto del pilote; que guardara criterios conservadores de análisis estructural. Unidad Funcional: Metro lineal de pilote preexcavado, de 65cm de diámetro, con una resistencia de concreto de 5000 PSI, realizado en la ciudad de Bogotá, bajo análisis de cargas de vivienda.

### 1.2.3.2. Establecimiento de límites del sistema

Los límites del sistema se determinaron con base en las actividades que intervienen en el proceso constructivo de pilotes que más relevancia poseen en términos de impactos ambientales, costos, tiempo de ejecución y necesidad de recurso (Materia prima o energía); adicionalmente, otro criterio que se tuvo en cuenta en la delimitación fue la información obtenida de procesos constructivos de os diferentes sistemas de pilotaje.



**Figura 4.** Esquema gráfico – Delimitación del Sistema

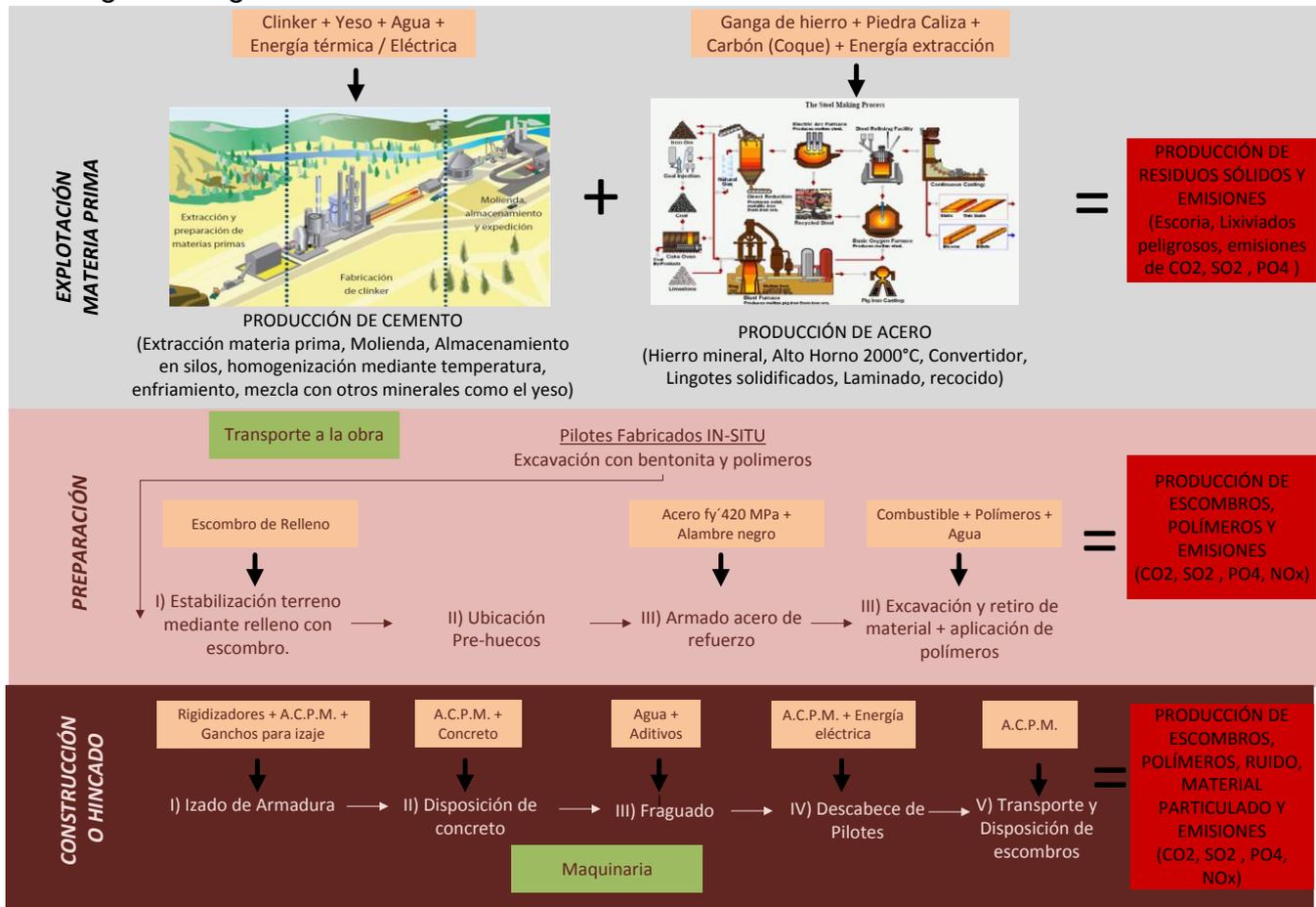
**Fuente.** Elaboración propia

En la Figura 4 se presenta el esquema gráfico como se describió el sistema en donde se enmarca el proceso de pilotaje y el cual será la base para determinar los límites del estudio. En este esquema es evidente la existencia de tres grandes etapas generales del proceso (Explotación materia prima, preparación y construcción e hincado), etapas que se pueden observar en cualquier tipo de pilotaje según su proceso constructivo. Del mismo modo, se indican los insumos necesarios (materia prima y energía) para los procesos de cada etapa y sus respectivos productos secundarios tales como desechos y emisiones. Cabe resaltar que la limitación de sistema no se ha realizado de forma más específica, debido a que se espera que en

el desarrollo de análisis se tengan características similares con respecto a los diferentes tipos de procesos constructivos de pilotes.

### 1.2.3.3. Entradas y salidas del proceso delimitado

Las entradas y salidas del proceso se observan de forma gráfica a través de la siguiente figura:



**Figura 5.** Flujo grama entradas y salidas – Pilotaje con bentonita o polímeros  
**Fuente.** Elaboración propia

## 1.3. FORMULACIÓN

### 1.3.1. Formulación de entradas y salidas del proceso

#### 1. Fase De Explotación Materia Prima Y Producción

Para esta etapa se tendrán en cuenta los resultados de ACV realizados previamente por otros autores para los procesos de producción de concreto y acero, esto con el fin de hacer provecho de la información existente y con base en esto continuar con un análisis de forma más detallada en torno a las etapas de preparación y construcción, sin dejar a un lado los resultados arrojados en la etapa de Explotación de materia prima. A continuación se presenta el análisis de inventario para la producción de concreto y acero.

#### 1.1. Producción de concreto:

El concreto, que se define como la mezcla entre cemento Portland (u otro cemento hidráulico), agregado fino, agregado grueso y agua con o sin aditivos (AIS , 2010), el cual se utiliza con fines comúnmente estructurales. En este sentido es necesario realizar el análisis de inventario por separado para cada uno de los materiales utilizados, sin embargo, de la bibliografía encontrada (ACV previamente realizados) se tomaron los resultados del análisis de inventario y evaluación de impactos para la mezcla; por tal razón se utilizarán los datos mostrados a continuación:

- a) Cemento: En el análisis de inventario del proceso de producción del Cemento, es necesario tener en cuenta que las entradas se deben clasificar en Consumo de recursos Renovables y No renovables; En esta etapa es necesario fijar un tipo de mezcla para realizar la cuantificación de insumos necesarios. En la Tabla 2 se presenta el resumen de los materiales necesarios para producir 1 Kg de Cemento Portland, se debe tener en cuenta que 1 metro lineal de pilote que tiene 0.365 m<sup>3</sup> de volumen y que se utilizará un concreto de 5000 PSi de resistencia a compresión no confinada el cual necesita aproximadamente 600 kg de cemento (HOLCIM, 2010).

**Tabla 2.** Entrada materia prima – Etapa de producción de cemento.

<b>PRODUCCIÓN CEMENTO PORTLAND</b>				
<b>Tipo de Recurso</b>	<b>Nombre</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad (ML de pilote)</b>
Material	Margra (Clinker)	Kg	1.6	350.4
Material	otros (Clinker)	Kg	0.27	59.13
Material	Clinker	Kg	0.94	205.86
Material	Yeso	Kg	0.06	13.14
Energía	Energía térmica	MJ	4.226	925.494
Energía	Energía eléctrica	MJ	0.318	69.642

**Fuente.** (HOLCIM, 2010).

Por otro lado, las salidas son Calentamiento Global, incidencia en la capa de ozono, acidificación, eutrofización, Formación fotoquímica de ozono, contaminación del aire por partículas, cancerígenos y metales pesados (Filho, 2001)

## 1.2. Producción de Acero

La producción de acero se comprende como las actividades necesarias para producir una cantidad determinada (generalmente medida en peso) de acero; dichas actividades son la extracción del hierro mineral u obtención de acero reciclado, procesos de fusión del mineral (Alto Horno 2000°C), conversión, colada continua, formación de palanquillas, recalentamiento, laminación, refrigeración, acabado (espiralizado, laminado, galvanizado, soldadura etc) y disposición final (DIACO, 2013). En la Tabla 3, se presentan los insumos necesarios para la producción de una tonelada de Acero fabricado de forma convencional (Alto Horno).

**Tabla 3.** Entrada materia prima –etapa de producción de Acero

<b>PRODUCCIÓN ACERO</b>				
<b>Tipo de Recurso</b>	<b>Nombre</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad (Tn de acero)</b>	<b>Cantidad (ML de pilote)</b>

PRODUCCIÓN ACERO				
Material	Ganga de hierro	Kg	1500	9000
Material	Piedra Caliza	Kg	225	1350
Material	Carbón (Coque)	Kg	750	4500
Energía	Extracción	MJ	1112750	6676500

**Fuente.** (Lawson, B. 1996).

Para determinar las salidas del proceso de producción del acero, se tomó como principal referencia el Manual De Inventario De Fuentes Puntuales, de donde se extrajeron los factores de emisión de esta producción asumiendo la situación más desfavorable y más probable (la cual para este caso, es la producción de acero mediante el proceso denominado “Horno de arco eléctrico – Sin control”; lo anterior se asumió teniendo en cuenta los factores de impacto nocivos de este tipo de proceso y a que es usado frecuentemente en la industria de acero.

2. Fase de preparación.
- 2.1. Relleno de estabilización.

La primera etapa a analizar es en la cual se dispone un material de relleno como soporte de la maquinaria que realizará los procesos posteriores, este material de bajo costo es difícil de caracterizar en cuanto a su composición, idealmente debe estar compuesto únicamente por escombros de edificaciones sin embargo la realidad de este producto en la ciudad de Bogotá es que además del material de escombros, contiene residuos de materia orgánica, residuos sanitarios, entre otros. La entrada de este material depende del área total de operación en obra para la cimentación, este estudio se realiza para un metro lineal de pilote donde los pilotes de diseño tienen una longitud total de 39.0 metros, los siguientes son los cálculos de relleno necesario para 1 metro lineal de pilote representativo:

$$\text{Área aferente} = \frac{\text{Área de Cimentación}}{\text{Número de pilotes}} \quad (1)$$

$$\text{Área aferente} = \frac{1180 \text{ m}^2}{82} = 14.6 \frac{\text{m}^2}{\text{pilote}}$$

**Volumen de relleno por metro de pilote pre- excavado** = 0.80m \* 14.6m<sup>2</sup>/pilote / 39.0m = **0.30m<sup>3</sup>**

**Tabla 4.** Entradas de la etapa de relleno.

ENTRADAS - RELLENO DE ESCOMBRO				
Tipo de Recurso	Nombre	Unidad	Cantidad (UN Pil.)	Cantidad (ML)
Equipo	Volqueta	Horas	0.1	0.003
Material	Escombros de relleno	M3	11.68	0.300

**Fuente.** Elaboración propia

- 2.2. Localización pre-huecos

En esta etapa se realiza el replanteo de los ejes de los pilotes, removiendo el material superficial que previamente se ha colocado como relleno, necesario para que el brazo de la máquina de perforación y colocación de los medios fluidos que se aplicaran en la etapa posterior pueda operar.

**Tabla 5.** Inventario de la etapa de pre-huecos.

<b>LOCALIZACIÓN – PREHUECOS</b>				
<b>Tipo de Recurso</b>	<b>Nombre</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad (UN Pil.)</b>	<b>Cantidad (ML)</b>
Material	Escombro de relleno	M3	0.51	0.013
Mano de Obra	Ayudante	Horas	2	0.051

**Fuente.** Elaboración propia

### 2.3. Perforación

○ Análisis de lodos bentoníticos

La bentonita extraída de los procesos de minería primero es transportada a la planta de procesamiento y almacenado. El material se pasa luego a través de la trituradora para reducir las piezas de arcilla a menos de 2,5 cm (1 pulgada) de tamaño. A continuación, la bentonita triturada se seca en secadores de lecho fluido o rotativos alimentadas con gas natural, petróleo o carbón para reducir el contenido de humedad de 7 a 8 por ciento (EPA, 1994).

La mezcla de bentonita con agua crea un fluido de alta densidad y viscosidad denominado lodo bentonítico, en estudios realizados para las bentonitas en España este valor es cercano a 102% y el límite plástico es cercano al 53%; su densidad es de 2.7 gr/cm<sup>3</sup> (Villemar, 2006).

Los lodos bentoníticos proporcionan una presión interna en la cavidad perforada que es mayor a la presión atmosférica al mismo tiempo que crea una película de mineral hidratado, garantizando la estabilidad de las paredes de la excavación.

Este material posteriormente será reemplazado por el concreto utilizado para la construcción del pilote. Se requerirán 12.94 m<sup>3</sup> de lodo bentonítico para estabilizar la perforación de 1 pilote que será hincado, la mezcla de bentonita se realiza en un 5.0% de volumen.

**Tabla 6.** Inventario de la etapa de perforación.

<b>PERFORACIÓN</b>				
<b>Tipo de Recurso</b>	<b>Nombre</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad (UN Pil.)</b>	<b>Cantidad (ML)</b>
Equipo	Piloteadora Tipo Kelly	Hora	5	0.128
	Planta de bombeo de lodos	Hora	5	0.128
Material	Bentonita	Kg	1747.1	44.80
Material	Agua	M3	12.94	0.332

**Fuente.** Elaboración propia

Es posible observar los factores de emisión debidos a la producción de bentonita en la tabla adjunta (matriz de salidas)

Para el cálculo de los factores de emisión de la piloteadora tipo Kelly, se estimó una potencia de operación de la máquina de 140 hp según especificaciones técnicas, de igual manera se usaron factores de emisión de maquinaria pesada de funcionamiento tipo hidráulico al no existir los estudios de emisiones específicamente para el equipo de perforación.

En cuanto a la planta de bombeo de lodos, el cálculo de la demanda de energía se realizó bajo las siguientes suposiciones:

- El bombeo se realiza con un flujo de 5lt/s
- La densidad del lodo bentonítico es de 1.04 Kg/m<sup>3</sup>
- La eficiencia de la planta de recirculación de lodos es del 70%
- Para el caso de estudio será necesaria una columna de 8.0m

La potencia requerida por el sistema de bombeo de la planta de circulación es:

$$P = \frac{\rho g Q \cdot H}{e} \quad (2)$$

$$P = \frac{1.04 \text{Kg/m}^3 * 9.81 \text{m/s}^2 * 0.005 \text{m}^3/\text{s} * 8.0 \text{m}}{0.7}$$

$$P = \frac{1.04 \text{Kg/m}^3 * 9.81 \text{m/s}^2 * 0.005 \text{m}^3/\text{s} * 8.0 \text{m}}{0.7}$$

$$P = 14.63 \text{ W}$$

La demanda de energía utilizada por la planta de bombeo de lodos es:

$$D.E. = P * t \quad (3)$$

Donde t es el tiempo de operación de la planta, en este caso 5 horas para el pilote de 39.0m

$$D.E. = 14.63 \text{ W} * 18000 \text{ s}$$

$$D.E. = 263.34 \text{ KJ}$$

Esa es la demanda de energía requerida para la fundición del pilote, y con la cual se calculará el índice respectivo perteneciente a la categoría de impacto ambiental de consumo de energía en Mega Joules.

#### 2.4. Armado de refuerzo

A continuación se procede a realizar el cálculo de refuerzo a flexión y a cortante, necesario para armar el pilote pre-excavado de 65cm de diámetro, de acuerdo a los diseños del caso para el cual se realiza el análisis de ciclo de vida.

En el armado de acero de refuerzo se utiliza alambre negro en un porcentaje del acero de refuerzo igual a 2.0 %.

**Tabla 7.** Entradas de la etapa de armado del acero de refuerzo.

<b>ENTRADAS - ARMADO DE REFUERZO</b>				
<b>Tipo de Recurso</b>	<b>Nombre</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad (UN Pil.)</b>	<b>Cantidad (ML)</b>
Material	Acero fy 420 Mpa	Kg	705.66	23.522
	Alambre Negro	Kg	14.11	0.470

**Fuente.** Elaboración propia

3. Fase de Construcción  
3.1. Izado de Armadura

El izado de la armadura es un procedimiento clave para la realización del pilote pre excavado, pues debe realizarse con todas las medidas que garanticen no sólo la seguridad del personal, sino la conservación de las características de la misma, en cuenta a separación de las varillas, traslapo, disposición, etc., factores claves para la obtención de un comportamiento estructural óptimo. El izado se realiza por medio de una grúa con la ayuda de ganchos de izaje; a su vez, deben usarse rigidizadores que contribuyan a mantener las características nombradas de la armadura. Se muestran a continuación los resultados tanto de entradas como de salidas de la actividad, mediante el promedio de rendimientos medidos directamente en obra.

**Tabla 8.** Análisis de entradas – Izado Armadura.

<b>IZADO DE ARMADURA</b>				
<b>Tipo de Recurso</b>	<b>Nombre</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad (Pilote)</b>	<b>Cantidad (ML)</b>
Equipo	Grúa	Horas	1	0.026
Material	Rigidizadores	Horas	1	0.026
	A.C.P.M.	Gal	6	0.154
	Ganchos para izaje	Horas	1	0.026
Mano de obra	Ayudante	Horas	1	0.026

**Fuente.** Elaboración propia

3.2. Disposición de concreto

El procedimiento de disposición de concreto, corresponde al vaciado del concreto en la perforación realizada. Según la descripción del procedimiento realizada, se requieren de varios elementos para la eficaz realización de la actividad. Mediante la medición de rendimientos directamente en obra, se obtuvo la siguiente información de las entradas:



**Figura 6:** Izado de tubo Tremie y Tolva, y vaciado de concreto.

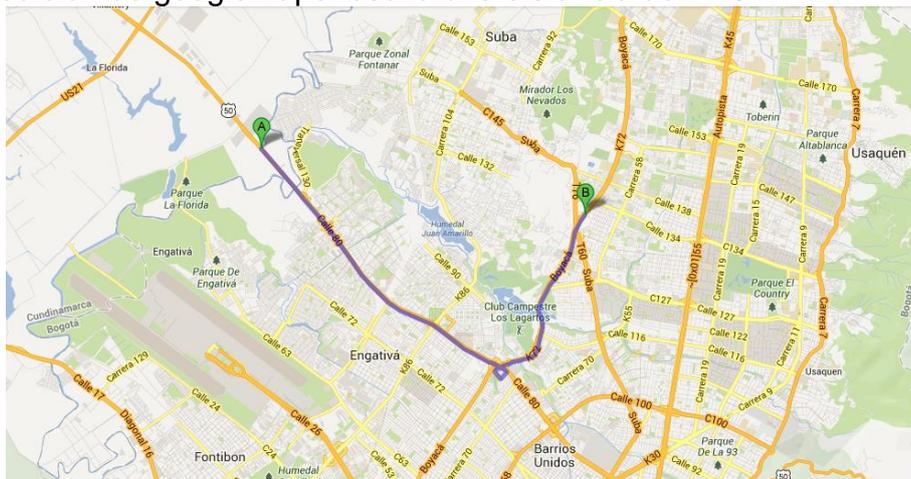
**Fuente.** Elaboración propia

**Tabla 9** Análisis de entradas – Disposición de Concreto.

<b>DISPOSICIÓN DE CONCRETO</b>					
<b>Tipo de Recurso</b>	<b>Nombre</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad (Por pilote)</b>	<b>Cantidad (ML)</b>	
Equipo	Grúa	Horas	2	0.051	
	Tubo Tremie	Horas	2	0.051	
	A.C.P.M. Grúa	Gal	12	0.308	
	A.C.P.M. Mixer	Gal	27.2	0.7	
	Tolva	Horas	2	0.051	
Material	Concreto	m3	14.24	0.365	
Mano de obra	Ayudante	Horas	2	0.051	

**Fuente.** Elaboración propia

Será de gran importancia para el presente análisis de inventario, la distancia recorrida por la mixer, para efectos de cálculo de residuos. Se muestra entonces a la ruta seleccionada con una de las plantas principales de la empresa ARGOS, se encuentra ubicada en el kilómetro 3 saliendo de Bogotá por la autopista Medellín. Con la medición de googlemaps resulta una distancia de 11.5 km.



**Figura 7.** Medición de la distancia entre la planta de concreto y la obra.

**Fuente.** Google Maps.

Ahora se calcula el consumo equivalente de combustible por metro lineal de pilote, de acuerdo a la distancia recorrida:

$$\frac{Gal}{ml} = \frac{1gal}{km} * \frac{11.5km}{1viaje} * \frac{1viaje}{6m^3} * \frac{0.365m^3}{ml} = \frac{0.7gal}{ml} \quad (4)$$

### 3.3. Fraguado

El fraguado es un proceso que no requiere como tal de materiales y equipos, pues se es intrínseco al proceso. Consiste en esperar un período de tiempo determinado, hasta que el concreto alcance la resistencia de diseño.

### 3.4. Descabece

Necesario para garantizar la funcionalidad de los amarres con los elementos posteriores de la estructura, y para eliminar el posible concreto contaminado del fondo de la excavación. Con un cálculo del volumen de descabece por pilote, y rendimientos tomados directamente en obra se llega a la siguiente información:

**Tabla 10** Análisis de entradas – Descabece de pilotes y cargue de material.

<b>DESCABECE DE PILOTES Y CARGUE DE MATERIAL</b>				
<b>Tipo de Recurso</b>	<b>Nombre</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad (Por pilote)</b>	<b>Cantidad (ML)</b>
Equipo	Martillo Percutor	Horas	0.8	0.021
	Minicargador	horas	0.17	0.004
Material	A.C.P.M.	Gal	0.04	0.001
	Energía eléctrica	Kw		
Mano obra	Operario Martillo	Horas	0.8	0.021
	Operario Minicargador	Horas	0.17	0.004

**Fuente.** Elaboración propia

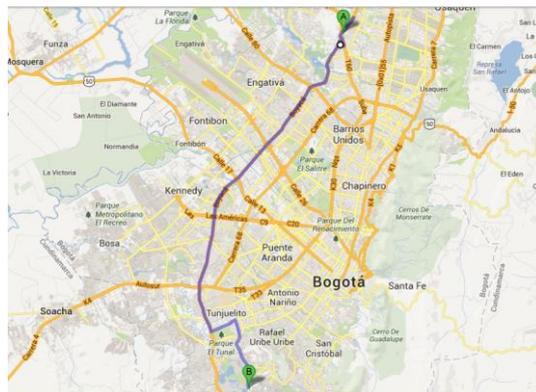
### 3.5. Transporte y Disposición de RCD

Una vez realizado el descabece del pilote, se genera un escombros que debe ser dispuesto debidamente en una escombrera autorizada. Se hizo la medición directa e la distancia entre el lugar de obra y la escombrera La Fiscala. En la Figura 8 se observa la medición, siendo A la obra, y B la escombrera considerada.

**Tabla 11** Análisis de entradas – Transporte y disposición de escombros.

<b>TRANSPORTE Y DISPOSICIÓN DE ESCOMBRO</b>			
<b>Tipo de Recurso</b>	<b>Nombre</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad (viaje)</b>
Equipo	Volqueta	Km	27.9
Material	A.C.P.M.	Gal/km	0.168

**Fuente.** Elaboración propia



**Figura 8.** Medición de la distancia entre la obra y la escombrera.

**Fuente.** Elaboración propia

Cabe mencionar que un viaje de volqueta doble troque es de 15m<sup>3</sup>, por lo cual debe hacerse la debida conversión al volumen equivalente de 1 metro lineal de pilote. Por

concepto de descabece por pilote se generan 1.35m<sup>3</sup> de escombros; ahora bien, por metro lineal se generan 0.035m<sup>3</sup>.

De esta forma se calcula el consumo por pilote y por metro lineal de pilote generado por el transporte de escombros así:

$$Gal(pil) = 0.168 \frac{gal}{km} * \frac{27.9km}{1 viaje} * \frac{1 viaje}{15m^3} * \frac{0.33m^3 de escombros}{pil} = 0.103 \frac{gal}{pil}$$

$$Gal(ml) = 0.103 \frac{gal}{pil} * \frac{1pil}{39ml} = 0.00264 \frac{gal}{ml} \quad (5)$$

Ahora para calcular la distancia equivalente a un metro lineal de pilote, se procede así:

$$Escombros Pilote = \pi * \frac{0.65m^2}{4} * 1m = \frac{0.33m^3}{pilote}$$

$$\frac{Km}{Pilote} = \frac{27.9km}{1 viaje} * \frac{1 viaje}{Escombros de 45 pil.} = \frac{0.62km}{pilote} * \frac{1pilote}{39ml} = \frac{0.62km}{ml}$$

### 1.3.2 Categorías de impacto ambiental

La evaluación del impacto ambiental del sistema se hizo bajo el análisis de todos los factores de emisión encontrados en el análisis de inventario, de modo tal, que se llegara a una agrupación funcional y descriptiva de los mismos, que pudiera caracterizar el impacto ambiental del pilotaje pre-excavado. Adicionalmente, mediante la búsqueda de bibliografía y revisión de documentos al respecto, se pudieron encontrar diferentes categorías de impacto ambiental típicas manejadas en un análisis de ciclo de vida; entre ellas se encontraron metodologías como RECIFE, IPCC, TRACI, entre otras, las cuales manejan diferentes categorías de impacto ambiental aplicables a ciertas etapas del proceso de análisis de ciclo de vida. (Departamento de Medio Ambiente, Planificación territorial, agricultura y Pesca Gobierno Vasco, 2009)

Una vez hecha la revisión de la bibliografía, y de los factores de emisión representativos en las salidas del inventario, se determinaron las categorías de impacto ambiental presentes en EL Anexo 4.

## 1.4 CONCLUSIÓN

A través del análisis de los datos obtenidos, tanto de entradas como de salidas del sistema, se pretende establecer el impacto ambiental en cada categoría establecida en el anexo 4, y de esta manera establecer una propuesta de reducción de los mismos.

Primero deberá evaluarse cada fase identificada en la figura 4, y las entradas y salidas establecidas en la figura 5, e interrelacionarse con las categorías de impacto anteriormente mencionadas.

Nótese que para cada categoría se estableció la unidad a considerar y las cargas contaminantes que harían parte de la obtención definitiva del valor de la misma. Es así como para un impacto ambiental, pueden existir una o varias cargas

contaminantes que sumadas, llegan a la obtención de un valor cuantitativo por impacto.

Así mismo se tuvieron en cuenta los diferentes factores de conversión necesarios, para llegar a la unidad equivalente del impacto evaluado, de tal forma que se pudieran operar entre sí todas las cargas contaminantes consideradas para un mismo impacto. Ahora bien, una vez establecidas las categorías de impacto ambiental y su modo de manejo matemático, se decidió realizar una evaluación por etapa del proceso, de modo tal que se pudieran identificar de forma particular y simple, las actividades del proceso de pilotaje que más generan efectos negativos sobre la categoría de impacto evaluada. De esta forma, por cada etapa del proceso (explotación, preparación y construcción) se encontrará el manejo de datos para cada categoría de impacto considerada. (Ver anexo 3)

Puede observarse en la matriz que es fácilmente identificable la categoría de impacto ambiental con mayores valores, y a su vez, qué cargas contaminantes son aquellas que generan porcentualmente más peso sobre el impacto evaluado; de esta manera se puede determinar de forma efectiva sobre qué cargas trabajar y a su vez sobre qué actividad generar posibles cambios y con ello mejorar el panorama en una posible propuesta alternativa.

De forma adicional, para llegar a conclusiones asertivas de todo el proceso en general, se decidió además considerar los totales para todo el proceso de pilotaje preexcavado, de carga contaminante por cada impacto ambiental evaluado, y de esta forma llegar a evaluar situaciones a nivel de impacto ambiental total.

Nótese entonces que de esta forma, es posible determinar cuál impacto ambiental tiene más peso sobre los efectos ambientales totales de la actividad.

Dado que se llegará a un escenario propositivo, es conveniente manejar formatos organizados que lo permitan y que contribuyan a la facilidad visual de los datos; por ello se decidió manejar el mismo procedimiento de modo paralelo para el escenario propositivo a realizar. (Ver anexos 2 y 3)

#### **1.4.1 Muestra de cálculo de un impacto ambiental, relacionando las entradas, salidas y evaluación.**

A continuación se calcularán las emisiones de PM10 debidas a la producción de bentonita necesaria para la estabilidad de la perforación de un metro lineal de pilote. Inicialmente tenemos los valores de la cantidad de mineral bentonítico necesario para perforar un metro lineal, en este caso en peso, cantidad que ha sido calculada en la hoja de entradas perteneciente a la etapa de preparación de la cavidad vertical, en el subproceso de perforación con lodos bentoníticos.

**Tabla 122.** Entradas – Actividad Perforación.

<b>ENTRADAS – PERFORACIÓN</b>				
<b>Tipo de Recurso</b>	<b>Nombre</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad (UN Pil.)</b>	<b>Cantidad (ML)</b>
Equipo	Piloteadora Tipo Kelly	Hora	5	0.128
	Planta de bombeo de lodos	Hora	5	0.128
Material	Bentonita	Kg	1747.09	44.80
Material	Agua	M3	12.94	0.332

**Fuente.** Elaboración Propia

Posteriormente en las hojas de cálculo de salidas, se ha referenciado el factor correspondiente a la emisión de partículas tipo PM10 como subproducto de la explotación unitaria de mineral bentonítico en peso, en este caso el factor seleccionado es el contenido en el estudio de factores de emisión en la explotación y tratamiento de minerales arcillosos, realizada por la EPA (Environmental Protection Agency, 1994).

$$PM_{10} = \frac{10 \text{ Kg}}{\text{Ton de producto}} \quad (6)$$

Seguido de la adecuada selección de la fuente del factor de emisión a considerar, se realiza el cálculo de la emisión para la unidad funcional que en el caso estudiado es un metro longitudinal, por medio del producto entre el factor de emisión y la cantidad establecida en las entradas:

$$\text{Carga contaminante} = \frac{10 \text{ Kg}}{\text{Ton de bentonita}} * \frac{44.80 \text{ Kg de bentonita}}{1000 \frac{\text{Kg}}{\text{Ton}}}$$

$$\text{Carga contaminante} = 0.45 \text{ Kg de } PM_{10}$$

Por lo tanto en la hoja de cálculo de salidas, es posible visualizar esta información, tanto de los factores de emisión como de las cargas contaminantes en la producción de la unidad funcional, tal como se muestra en la tabla de salidas a continuación.

**Tabla 13.** Salidas etapa de preparación - Pilotaje

ETAPA	ACTIVIDAD	PRODUCTO	SUBPRODUCTO (Residuos y Contaminantes)	CARGA CONTAMINANTE	
PREPARACIÓN	Relleno de escombros	material de relleno	Emisiones de volqueta	Kg CO / día	
				Kg VOC / día	
				Kg NOx / día	
				PM10 (Kg/día)	
				Kg SO <sub>2</sub> / día	
	Localización - prehuecos	ubicación del pilote	Escombros	Kg de residuos sólidos	
	Perforación	Aplicación de lodos	Producción de bentonita	Suelos con alto contenido de M.O.	Kg de residuos sólidos
				Emisiones de perforadora Kelly	PM (Kg/Tn de producto)
					PM10 (Kg/Tn de producto)
					Kg NOx/ tn producto
					Kg SOx/ tn producto
					Kg CO <sub>2</sub> / tn producto
					Kg PST/ tn producto
					Kg CO / hr
Kg HC /hr					
Kg NOx /hr					
Kg PM /hr					
Decibeles					
Armado de acero de refuerzo		Emisiones de planta de recirculación	Energía (MJ/pilote)		

**Fuente.** Elaboración Propia

Esta carga contaminante está asociada a la unidad funcional como ya ha sido mencionado y hasta este momento se ha realizado para un escenario, el primero, denominado línea base. El siguiente paso consiste en realizar la evaluación de cada categoría de impacto ambiental, la cual depende de todas las cargas contaminantes y las emisiones generadas en todos los procesos que se encuentran dentro de los límites del sistema y ya se están claramente establecidos y detallados. La tercera hoja de cálculo que se ha propuesto contiene la evaluación de las categorías por cada una de las 3 grandes etapas del proceso de pilotaje pre-excavado, teniendo en cuenta los factores de conversión usados en las equivalencias propuestas en las metodologías de evaluación, de la manera en que se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 14. Salidas etapa de Preparación – Pilotaje.**

ETAPA	CATEGORIAS DE IMPACTO	UNIDAD	CARGAS CONTAMINANTES	FACTOR DE CONVERSIÓN	LINEA BASE		Escenario 1	
					RESULTANTE	Total	RESULTANTE	
PREPARACIÓN	Agotamiento de recursos abióticos	Kg mineral extraído			44,797	44,797	44,797	
	Potencial de calentamiento global	Kg CO2 Equivalente	CO2	1	21,189	21,189	21,189	
			CH4	23	0,000		0,000	
			N2O	290	0,000		0,000	
	Demanda de energía	Mega Joules	MJ	1	0,007	0,007	0,007	
			SO2	1	2,228E-07		0,000	
	Acidificación	Kg de SO2 equivalente	NOx	0,7	0,166	0,116	0,166	
			NH3	1,88	0,000		0,000	
			SO2	0,048	2,228E-07		0,000	
	Formación Smog fotoquímico	Kg C2H4 equivalente	NOx	0,028	0,166	1,02E-05	0,166	
			CO	0,027	0,016		0,016	
			CH4	0,006	0,000		0,000	
			NMVOG	1	8,262E-06		0,000	
			NOx	0,13	0,166		0,022	0,166
			NH3	0,35	0,000			0,000
	COD	0,022	0,000	0,000				
	Eutrofización	Kg PO4 equivalente	Fosfato	1	0,000	0,022	0,000	
			Nitrato	0,1	0,000		0,000	
			SO2	0,0096	0,000		0,000	
			NOx	1,2	0,166		0,166	
			CO	2,4	0,016		0,016	
			HC	570000	0,006		0,006	
			NMVOG	0,64	8,262E-06		0,000	
			PM10	0,82	0,448		0,448	
			NH3	0,1	0,000		0,000	
			HC	28000	0,006		170,068	0,006
	Emisiones al agua	Gramos de sustancia contaminante				170,068	0,006	
Residuos Sólidos	Kg de residuo generado			620,785	620,785	620,785		
Ruido	Decibeles (Db)			101,000	101,000	101,000		

**Fuente.** Elaboración Propia

Nótese que los 0.045 Kg de PM10 aportan carga contaminante a la categoría de emisiones al aire, estos deben ser convertidos a Kg equivalentes de diclorobenceno haciendo uso del valor la columna de factor de emisión, para el caso de PM10 es de 0.82. Este producto hace parte de la sumatoria de cargas equivalentes a la carga representativa de la categoría de impacto seleccionada y por lo tanto dependerá de los demás subprocesos ejecutados en la etapa de preparación.

Por último se suman todos los totales por categoría de impacto calculados en cada etapa para establecer las cargas contaminantes del proceso. En los anexos es posible observar la carga contaminante que aporta el proceso por etapa y en general, para las categorías de impacto ambiental seleccionadas.

#### 1.4.2 Interpretación de resultados

Con base en lo anterior se cuantificaron los impactos ambientales para la línea base y para un escenario propuesto, en donde se busca disminuir o mitigar dichos impactos.

##### 1.4.2.1 Análisis de Línea Base

Etapa de preparación: En la etapa de preparación del pilotaje, cuya actividad principal es la excavación y estabilidad de las paredes de la cavidad para hacer posible la posterior colocación del material cementante del pilote, el subproceso de perforación con medios fluidos de alta consistencia resulta ser el más contaminante en términos cualitativos. Esto debido principalmente a las emisiones generadas en la etapa de explotación y obtención de los minerales arcillosos, proceso que genera contaminación del aire y de agua traducido en toxicidad humana.

Las cargas contaminantes más importantes de toda la etapa de preparación de la cavidad del pilote son las emisiones al aire con 3462.27 Kg de diclorobenceno equivalente y emisiones al agua con 170Kg de HC por metro de pilote excavado, este par de categorías configuran el potencial de toxicidad humana por lo que es evidente que estas categorías son las que mayor atención requieren, sin embargo la discusión de los resultados de la línea base y los demás escenarios se realizará posteriormente.

La cantidad de residuos sólidos generados es igualmente importante, 620.78 Kg de residuos sólidos son generados en esta etapa del proceso y son debidos a la remoción del relleno de estabilización, y del material natural que es excavado para la posterior colocación del pilote. Otras categorías que se ven altamente afectadas en este proceso son la de ruido, agotamiento de recursos abióticos y potencial de calentamiento global. En términos generales y no con el detalle que requiere un análisis de este tipo de datos, es posible afirmar que las categorías de acidificación, formación de smog fotoquímico y eutrofización presentan cargas pequeñas, por debajo del Kg de la unidad equivalente definida para la respectiva categoría

Etapa de construcción: Según la evaluación realizada para la etapa de construcción del proceso de pilotaje, se encuentra un bajo impacto ambiental en las categorías de acidificación, formación smog fotoquímico y eutrofización, razón por la cual para esta etapa no se harán modificaciones en los procesos que devengan de dichos impactos. Puede notarse que en la evaluación numérica de las cargas contaminantes por impacto ambiental según etapa (Anexo 3), los valores resultantes presentan una variabilidad notoria, encontrándose los mayores para los siguientes impactos ambientales:

Potencial de calentamiento global, con 1.9 de Kg CO<sub>2</sub> Equivalente, generados en su totalidad por CO<sub>2</sub>. Este CO<sub>2</sub> se presenta por las emisiones resultantes de la acción de la grúa, y transportes del camión mezclador y la volqueta, cada una en las actividades que interfieren.

Así mismo se encuentra en gran magnitud la demanda de energía, con un valor de 9.4MJ, correspondiente a la acción de la maquinaria pesada necesaria en la etapa de construcción. Las emisiones al aire y al agua representan unas de las categorías con mayor impacto, pues con el factor de conversión encontrado para cada una de ellas se llega a valores cercanos a 2000 kg 1,4-dichlorobenzene-eq. Correspondientemente. Nótese además que los residuos sólidos generados en esta etapa, son de 75kg, y el total de ruido considerada de 75 Db; cabe mencionar que para la obtención de éste último resultado, se decidió sumar todas las actividades que generan ruido, y con ello llegar a caracterizar el panorama más crítico de contaminación auditiva.

Según el análisis descriptivo anterior, se puede determinar qué etapas del proceso generan las mayores cargas contaminantes según el impacto ambiental considerado, de esta forma se procede a realizar propuestas de modificaciones o alternativas en esta etapa, y con ello determinar un posible escenario de mejora respecto a la línea base.

#### **1.4.2.2 Análisis del escenario propuesto**

Etapa de Explotación Materia Prima: Como se puede observar en el Anexo 2, donde se presentan las salidas para cada una de las actividades que intervienen en la producción de acero, los impactos de mayor relevancia son la demanda de energía, Generación de residuos sólidos. Con base en lo anterior, y mediante el uso de literatura actual se optará por proponer: El uso de combustibles alternativos en la maquinaria necesaria para la explotación de los minerales, el uso de materias primas alternativas como suelos contaminados que sirven como insumo para la producción de Clinker o cemento (Reduce el uso de recurso abiótico en un 10%), reutilización de los sobrantes generados en la producción del acero, tales como la chatarra y hojalata (Reducción de uso de mineral en aproximadamente un 20%).

Etapa de Preparación: No se consideró en este estudio, otro escenario que involucre la modificación de los subprocesos funcionales de esta etapa, sin embargo se propone considerar el efecto de la sustitución de los lodos bentoníticos en la

perforación de la cavidad del pilote por fluidos compuestos de polímeros estables que permitan la estabilidad y sean de fácil manejo con equipos similares u otros equipos que involucren diferentes tecnologías a las propuestas en este estudio. Estas mezclas poliméricas en la actualidad existen y son utilizadas comercialmente para actividades como la del pilotaje pre excavado.

Etapa de Construcción: Dados los resultados de la línea base es posible proponer las siguientes modificaciones al sistema, cabe mencionar que no tendrán un componente teórico sustancial significativo, pues sólo los expertos podrían determinar de forma realmente asertiva la forma de realizar una modificación con todo el sustento teórico pertinente, se propone entonces:

- Reutilización de escombros generados por descabece de pilotes: Esta actividad no sólo genera residuos sólidos, a su vez, debido al transporte necesario para su disposición, representa aportes notables en emisiones transformadas después en impactos ambientales.

Se hace entonces una propuesta en la que el escombros producto del descabece de pilotes se reutilice en la obra, en forma de relleno ya sea para urbanismo o para soporte de una estructura preliminar. Siendo así se eliminarían todos los aportes generados por la etapa descrita en la matriz como “transporte y disposición de escombros”, manteniendo únicamente el valor de PM10, pues el material particulado debido a la descarga de material sigue presentándose así la distancia de transporte del mismo sea mínima. (Ver valores del escenario 1 para la etapa, en los anexos 2 y 3).

A su vez en la etapa “cargue de material”, se eliminaría el material particulado generado por el cargue, pues es una actividad que ya no se realizaría.

- Evaluación del rendimiento de máquinas, disminución de las tareas no productivas: Mediante metodologías de aprobación y aplicación mundial, como la llamada “Lean Construction”, se pueden determinar, evaluar y eliminar las actividades no productivas de una obra, ya sean producto de experiencia del operario, pérdida voluntaria de tiempo, demoras en las actividades administrativas de obra, etc. Mediante un seguimiento juicioso de las causas de determinado rendimiento, como es el caso de la grúa tanto para izar la armadura, como para fundir el concreto, podría lograrse una disminución en los tiempos de operación de la misma, y con ello una reducción directa de las emisiones asociadas. Se hará entonces una reducción del 25% en el tiempo de operación de la grúa. (Ver valores del escenario 1 para la etapa, en los anexos 2 y 3). (Gil, 2011)
- Disminución del desperdicio: Tanto en términos económicos como ambientales, el desperdicio de concreto genera residuos sólidos que representan una pérdida sustancial en el insumo necesario para la realización de la actividad de obra. Realizando una revisión previa del conjunto tolva-barras de acero del proceso “disposición del concreto”, e identificando posibles interferencias al momento de fundir el concreto, el desperdicio puede reducirse, considerando para ésta evaluación una reducción al 2.5% (Ver valores del escenario 1 para la etapa, en los anexos 2 y 3). En el anexo 3, podrá verse el porcentaje de reducción de los impactos ambientales, aplicando las anteriores modificaciones.

### **1.4.3 CONCLUSIONES**

Mediante el uso de la metodología presente en este análisis, se puede observar la importancia de tener identificados los impactos ambientales por etapas y subprocesos, ya que esta forma de identificación facilita la determinación de las actividades o subprocesos más críticos (de mayor impacto ambiental). Igualmente, este tipo de clasificación facilita la toma de decisiones (acciones) encaminadas a reducir los impactos ambientales negativos, con las cuales se conforma los escenarios de comparación con respecto a la línea base.

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida, permite abordar un procedimiento evaluado de manera integral, contemplando las actividades necesarias para su realización y analizando todo el inventario resultante de las mismas. Esto permite tener una visión global del proceso y con ello establecer estrategias que permitan modificar las características ambientales más desfavorables encontradas.

Dado el detalle necesario para realizar un buen inventario, se debe disponer de gran cantidad de información que permita su realización efectiva, de preferencia del país en el que se está desarrollando el estudio; sin embargo se encontró, que en la gran cantidad de bibliografía consultada, no existían los valores de cargas contaminantes necesarios para la realización del inventario. Debido a esto fue necesario el uso de información de otros países que puede generar riesgos grandes de error en los resultados encontrados.

El análisis de Ciclo de Vida del pilotaje pre excavado arrojó resultados contundentes para el impacto de toxicidad, pues mediante la evaluación realizada, el factor más determinante cuantitativamente para esta categoría (HC), se encontraba presente en varias de las actividades del proceso; en su mayoría, relacionadas con la emisión de vehículos. Es así, como mediante la observación y análisis de resultados, se decide crear estrategias de disminución de distancias recorridas, de tal forma que esta toxicidad se redujera de forma significativa, toda vez que la distancia recorrida y los HC tienen un comportamiento directamente proporcional.

Así mismo la producción de residuos sólidos, representa una magnitud considerable en el proceso, pues se generan de manera inherente al proceso, residuos producto de excavación y de demolición que son inevitables. A pesar de ello, su disposición también genera consigo otros impactos también evaluados, que pueden evitarse mediante el aprovechamiento de los recursos en actividades secundarias de gran utilidad.

Los resultados del ACV no pueden ser dimensionados correctamente si no se realizan modificaciones a los procesos en donde sea posible ver las variaciones en los impactos ambientales, estudios como este deben ser indispensables en el sector de la construcción, permitiendo cuantificar el total de los impactos que genere una obra específica y controlando todas las categorías que en el presente documento se han identificado, con especial atención sobre las emisiones que aumentan el potencial de calentamiento global, de eutrofización y que afecten a la salud humana, tal como se ha mostrado, estas son las categorías más sensibles del proceso.

## BIBLIOGRAFÍA

- (2013). *Estudio de suelos Hostería San Gabriel*. Bogotá.
- AI. S. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá: MAVCT.
- Benveniste. (2011). *Análisis de Ciclo de Vida y Reglas de Categoría de Producto en la Construcción - El Caso de las Baldosas Cerámicas*.
- Departamento de Medio Ambiente, Planificación territorial, agricultura y Pesca Gobierno Vasco. (2009). *Análisis de ciclo de vida y huella de carbono*.
- DIACO. (2013). *Gerdau Diaco*. Recuperado el 17 de Junio de 2013, de Gerdau Diaco:  
<http://www.gerdau.com.co/PRODUCTOSYSERVICIOS/ProcesoProduccionAcero.aspx>
- Environmental Protection Agency. (1994). Clay Processing. *Emission Factor Documentation for AP-42*.
- EPA. (1994). *Emission factor documentation for AP*.
- Filho, A. C. (2001). *IDENTIFICACION Y EVALUACION DE RIESGO ACCIONES PRIORIDAD RESPONSABLE*. Barcelona: Universidad Politecnica de Cataluña.
- Garrain, D. (2009). Desarrollo y aplicación de las categorías de impacto ambiental de ruido y de uso de suelo en la metodología del análisis del ciclo de vida. Universitat Jaume.
- Gil, L. E. (2011). *Apuntes de Clase - Gestión en construcción*. Bogotá.
- HOLCIM. (2010). *Recomendaciones para dosificación de mezclas de concreto y mortero*. Bogotá.
- ISO 14040. (2006). *Environmental Management - LVA - Principles and framework*.
- Restrepo, C. (2012). *Estudio de suelos Proyecto Panoramia Parck*. Bogotá.
- Universidad de los Andes. (1996). *Mapa de zonificación geotécnica de Santafe de Bogotá D.C*. Bogotá.
- Universidad de Oriente. (2006). Procesos constructivos de pilotes en concreto, prefabricados y colados insitu en el amms San Miguel y La Unión. En VI. *Procesos constructivos de pilotes en concreto, prefabricados y colados insitu*. El Salvador.
- Urbano, I. (2002). *Pliegos de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*. España.
- Villemar, R. G. (2006). *Estudio de la Bentonita FEBEX, sometida a las condiciones de almacenamiento geológico profundo*.
- ICONTEC, I. C. (10 de Septiembre de 2007). Gestión Ambiental, Análisis de Ciclo de Vida - Requisitos y Directrices. *NTC - ISO 14044*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- ISO. (15 de Junio de 1997). International Standard ISO 14040. *Environmental Managment - Life cycle assessment - Principles and Framework*.
- Rivela, B. (2010). El Análisis de Ciclo de Vida, Una Aproximación Necesaria. *Construcción sostenible, nuevas perspectivas y normalización*. Madrid.
- Urbano, I. (2002). *Pliegos de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*. España