

**ZONAS DE RIESGO POR EFECTO DE LA CARBONATACIÓN ACELERADA  
EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO A CAUSA DEL DIÓXIDO DE  
CARBONO (CO<sub>2</sub>) VEHICULAR EN PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER**

**EDGAR ENRIQUE LA ROTTA VILLAMIZAR**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER  
2018**

**ZONAS DE RIESGO POR EFECTO DE LA CARBONATACIÓN ACELERADA  
EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO A CAUSA DEL DIÓXIDO DE  
CARBONO (CO<sub>2</sub>) VEHICULAR EN PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER**

**EDGAR ENRIQUE LA ROTTA VILLAMIZAR**

**Tesis de grado para optar por el título de  
MAGISTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**DIRECTOR  
PhD. JAROL DERLEY RAMON VALENCIA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER  
2018**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

**JURADO**

---

**JURADO**

**Pamplona, 2018**

### ***A DIOS Y A MI FAMILIA***

A Dios primeramente a quien encomiendo mis proyectos, mi familia, el trabajo, la salud, el éxito de mis hijos y la continuidad de esta gran empresa.

A mi familia quien con su apoyo incondicional veló por la realización exitosa del proyecto.

A mis tres hijos, Fabián Andrés, Mariana y Mariam Sofía, que Dios los proteja, y los guie en los senderos de la vida.

A mis dos viejos, quienes desde la tumba vigilan dichosos los logros alcanzados, que mí Dios los tenga en su santa gloria, descanso eterno.

A mi hermana Marleny quien sentada apoya mis proyectos y aplaude mis triunfos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A las personas e instituciones que apoyaron este proyecto de investigación les quiero dar mis más sinceros agradecimientos, todo en pro de los resultados obtenidos y de las experiencias vividas.

A Jacipt Alexander Ramón, Director de la Maestría, su apoyo incondicional, pieza clave de este logro.

A Jarol Derley Ramón Valencia, Director de la Investigación.

A mis Profesores, todos dechados de virtud, sabiduría y conocimiento.

A mis compañeros de clase, colaboradores incansables, amistades valiosas que trascenderán los tiempos.

A la Universidad de Pamplona, por su apoyo académico, institucional y económico.

A John Caballero, por sus aportes en la investigación.

A la empresa privada por permitir la ubicación de los puntos de monitoreo.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	12
1. INTRODUCCIÓN .....	13
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	15
3. JUSTIFICACIÓN .....	17
4. OBJETIVOS .....	18
4.1 OBJETIVO GENERAL .....	18
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA, TÉCNICA Y NORMATIVA .....	19
5.1 ANTECEDENTES .....	19
5.2 MARCO TEÓRICO.....	24
5.2.1 Conceptualización del CO <sub>2</sub> y emisiones por flujo vehicular.....	24
5.2.2 Caracterización del flujo vehicular .....	25
5.2.3 Patología Estructural.....	26
5.2.3.1 Carbonatación .....	28
5.2.3.2 Despasivación .....	34
5.3 MARCO LEGAL .....	34
5.4 MARCO CONTEXTUAL.....	36
6. ESTRUCTURACIÓN Y DESARROLLO METODOLÓGICO .....	37
6.1 Fase I. Caracterización y cuantificación del flujo vehicular .....	38
6.2 Fase II. Análisis de edificaciones amenazadas .....	40
6.3 Fase III. Determinación del Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ).....	41
6.4 Fase IV. Mapa de riesgo de Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) total para Pamplona .....	43
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	44
7.1 Caracterización y cuantificación del flujo vehicular.....	44
7.2 Análisis de edificaciones amenazadas .....	48
7.3 Determinación del Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	52
7.4 Mapa de riesgo por Dióxido de Carbono para el municipio de Pamplona ....	67
7.5 Comparación de la evolución del dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) mundial .....	69

8. CONCLUSIONES .....	71
9. RECOMENDACIONES .....	73
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	74
11. ANEXOS .....	78
ANEXO I. FORMATOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN PRIMARIA ...	78
Formato para aforo vehicular .....	78
Formato de datos de carbonatación .....	79
FORMATO DE MEDICIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO <sub>2</sub> ) .....	80

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Puntos estratégicos de medición de CO <sub>2</sub> .....	43
<b>Tabla 2</b> Estadística descriptiva de CO <sub>2</sub> y Temperatura .....	64
<b>Tabla 3</b> Coeficiente de correlación para Flujo Vehicular y Dióxido de Carbono ....	65
<b>Tabla 4</b> Coeficiente de correlación para Dióxido de Carbono, Frente de carbonatación, Temperatura y Humedad Relativa.....	65
<b>Tabla 5</b> Nivel de riesgo por Dióxido de Carbono y Frente de Carbonatación .....	68

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Proceso de carbonatación y despasivación de un elemento estructural	27
<b>Figura 2</b>	Estructura en concreto y mampostería expuesta sin protección	28
<b>Figura 3</b>	Proceso de carbonatación	29
<b>Figura 4</b>	Presentación preliminar del elemento estructural a intervenir	31
<b>Figura 5</b>	Elemento estructural perforado	32
<b>Figura 6</b>	Posición del frente de carbonatación	32
<b>Figura 7</b>	Sección cuadrada de un elemento estructural tipo columna	33
<b>Figura 8</b>	Localización general municipio de Pamplona, Norte de Santander	37
<b>Figura 9</b>	Metodología de la Investigación	38
<b>Figura 10</b>	Localización general puntos de aforo de flujo vehicular	39
<b>Figura 11</b>	Localización general de los puntos de medición de carbonatación	40
<b>Figura 12</b>	Ubicación puntos de medición de Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	41
<b>Figura 13</b>	Puntos de medición de Dióxido de carbono por curva de nivel	42
<b>Figura 14</b>	Total de vehículos transitados durante el periodo de aforo	44
<b>Figura 15</b>	Volumen de vehículos transitados durante el periodo de aforo	45
<b>Figura 16</b>	Volumen de vehículos transitados por horario de aforo	46
<b>Figura 17</b>	Distribución porcentual de los vehículos transitados por la estación de aforo vía a Bucaramanga	47
<b>Figura 18</b>	Distribución porcentual de los vehículos transitados por la estación de aforo vía a Cúcuta	48
<b>Figura 19</b>	Distribución porcentual de los vehículos transitados por la estación de aforo ISER	48
<b>Figura 20</b>	Frente de carbonatación acumulado para el periodo de medición	49
<b>Figura 21</b>	Frente de carbonatación general para el periodo de medición	50
<b>Figura 22</b>	Avance anual del frente de carbonatación	51
<b>Figura 23</b>	Comportamiento espacial CO <sub>2</sub> monitoreo 1-Mañana	52
<b>Figura 24</b>	Comportamiento espacial CO <sub>2</sub> monitoreo 1-Tarde	53
<b>Figura 25</b>	Comportamiento espacial CO <sub>2</sub> monitoreo 1-Noche	54
<b>Figura 26</b>	Comportamiento espacial CO <sub>2</sub> monitoreo 1-Promedio	55
<b>Figura 27</b>	Comportamiento espacial CO <sub>2</sub> monitoreo 2-Mañana	56
<b>Figura 28</b>	Comportamiento espacial CO <sub>2</sub> monitoreo 2-Tarde	57
<b>Figura 29</b>	Comportamiento espacial CO <sub>2</sub> monitoreo 2-Noche	58
<b>Figura 30</b>	Comportamiento espacial CO <sub>2</sub> monitoreo 2-Promedio	59
<b>Figura 31</b>	Comportamiento espacial del CO <sub>2</sub> Total	60
<b>Figura 32</b>	Comportamiento espacial de la Temperatura-Mañana	61
<b>Figura 33</b>	Comportamiento espacial de la Temperatura-Tarde	62
<b>Figura 34</b>	Comportamiento espacial de la Temperatura-Noche	63
<b>Figura 35</b>	Concentraciones de dióxido de carbono por curva de nivel	66

**Figura 36** Mapa de riesgo por Dióxido de Carbono para el municipio de Pamplona .....67

**Figura 37.** Concentración de dióxido de carbono en el observatorio Mauna Loa..69

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO I. FORMATOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN PRIMARIA ...	78
Formato para aforo vehicular .....	78
Formato de datos de carbonatación .....	79
Formato de medición de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	80

## RESUMEN

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es un gas de efecto invernadero que no solo afecta al medio ambiente y la salud, también influye en las patologías estructurales sobre las edificaciones por procesos como la carbonatación y la despasivación en estructuras, pues se mezcla con el agua en cualquier estado e ingresa a través de los poros de la masa de concreto afectando el concreto y posteriormente el acero de refuerzo. En la presente investigación se analizó la incidencia que presenta el aumento de la contaminación ambiental por efecto de la concentración del dióxido de carbono sobre las estructuras de concreto reforzado aferentes al área del corredor vial de la vía nacional en la zona urbana del municipio de Pamplona. Para esto, se realizó un inventario vehicular de una semana en los tres 3 corredores Viales Nacionales que ingresan a Pamplona provenientes desde ciudades como Cúcuta, Bucaramanga y Saravena, categorizando los vehículos de acuerdo a las clasificaciones del Ministerio de Transporte e Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Luego, se efectuaron mediciones de Dióxido de Carbono en puntos estratégicos, teniendo en cuenta la variación altitudinal. Más adelante, se realizaron experimentos de patología estructural para la identificación de las relaciones de daño asociadas a la influencia del CO<sub>2</sub> sobre las estructuras apostadas en los 3 principales corredores viales del municipio. Los resultados mostraron que las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes del flujo de aproximadamente 37173 vehículos deterioran de forma lesiva las edificaciones construidas con concreto tradicional y con acero de refuerzo. En este contexto, las incidencias del grado de contaminación del dióxido de carbono presentan una relación directa sobre el aumento desmedido de procesos patológicos a través del fenómeno de la carbonatación del hormigón y de la despasivación del acero de refuerzo, los cuales se constituyen en riesgo de colapso prematuro de las edificaciones amenazadas.

**Palabras clave:** Carbonatación, Despasivación, Emisiones, Estructura amenazada, Hormigón, Patología.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las ciudades grandes e intermedias en Colombia han visto crecer su parque automotor de una forma alarmante en los últimos quince años, la producción asociada a la inminente demanda, los bajos costos de los vehículos y las facilidades de financiación han puesto casi en cada hogar uno, dos y hasta tres automotores. A pesar de las medidas tomadas por las autoridades ambientales y el ejecutivo local, regional y Nacional, la contaminación generada por emisiones vehiculares sigue en aumento de forma desproporcionada dejando ciudades más contaminadas, aumento de enfermedades respiratorias y otros daños colaterales en la salud, entre otras consecuencias. El problema se acrecienta por la tendencia del colombiano a preferir el vehículo por encima de otros medios masivos de transporte, lamentablemente las políticas estatales en la masificación de otros medios de movilidad, las topografías accidentadas sobre las cuales están dispuestas ciudades y carreteras y la proliferación de concesionarios amparados en tratados de libre comercio hacen que el uso del transporte terrestre se haya posicionado muy por encima de otras formas de locomoción como el aéreo, férreo y náutico.

Como lo expone Montani (2000) y Valle, Pérez y Martínez (2001), citados por Correa et al. (2008), el proceso de carbonatación ocurre cuando el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio alcalino en carbonato de calcio, que tiene un pH más bajo, lo que produce la despasivación del acero de refuerzo y, por ende, su resistencia a la corrosión. La combinación de los agentes agresivos tiene un impacto sinérgico, acelerando el proceso de degradación del concreto y la del refuerzo, pues se produce corrosión y debilita las estructuras.

De acuerdo con lo anterior, la presente investigación apunta a determinar las edificaciones representativas que padecen las patologías enunciadas y el grado de lesión, su vulnerabilidad y las estrategias de salvamento que se pueden aplicar antes de recomendar patología forense, teniendo en cuenta la incidencia del Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) asociado al flujo vehicular.

La estructura capitular de la presente investigación se establece a partir de tres grandes capítulos. El primer capítulo abarca la fundamentación teórica, técnica y normativa referente a los procesos de patología estructural asociados a la influencia del Dióxido de Carbono y el aumento del parque automotor en Colombia. El segundo capítulo comprende la estructuración y desarrollo metodológico que se aplicó para dar cumplimiento a los objetivos propuestos. Finalmente, el tercer capítulo presenta

los resultados y discusión derivados de la identificación del flujo vehicular transitado por las vías del municipio, el análisis de patología estructural sobre las edificaciones amenazadas por la influencia del CO<sub>2</sub>, las mediciones de concentraciones de CO<sub>2</sub> en puntos estratégicos y la identificación de las zonas de riesgo por CO<sub>2</sub> en el municipio de Pamplona.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El aumento desmedido de vehículos está generando una cantidad de contaminantes en forma de gas producido por la quema de combustibles fósiles al interior de cada máquina, entre los que sobresale el Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) como el más letal, debido a sus características antropogénicas y a los compuestos secundarios que genera; es considerado como un gas malicioso mas no como un gas altamente peligroso para la salud humana y además de estos riesgos produce deterioros a los materiales donde logra depositarse.

De otro modo, el concreto reforzado, material compuesto que se ha posicionado mundialmente como una forma rápida, económica y resistente de construcción de infraestructura, ha ganado buenos adeptos convirtiéndose en el preferido por los constructores por encima del acero, la madera, los productos cerámicos y mampuestos, incluso dejando atrás la cal, el yeso, el caolín y los materiales vegetales como la guadua y el bahareque. Sin embargo, diversos estudios han revelado efectos secundarios adversos a la utilidad del concreto reforzado, entre los que sobresale una enfermedad relativamente nueva, conocida como carbonatación, en la que el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que está presente de forma abundante en el ambiente ataca de forma lenta pero letal al concreto y reduce significativamente su resistencia; además, mezclado con agua acelera el proceso de destrucción sobre las constricciones tradicionales de concreto y acero.

La ciudad de Pamplona no es ajena a este fenómeno, puesto que alimenta las dos variables que incrementan la amenaza; de una parte, el crecimiento de las obras civiles de tipo gubernamental y privado; y de otra parte el aumento del volumen de contaminantes generado por los vehículos que la transitan. El crecimiento demográfico, el auge de la Universidad de Pamplona, obras de infraestructura vial y de vivienda desataron una ampliación considerable de construcciones para albergar a los estudiantes, empleados, autoridades de refuerzo y personal de servicio que requerían arrendamientos temporales o adquisición definitiva de bienes inmuebles.

Además, el crecimiento de la población y la expansión urbana han generado una alta demanda en la movilidad vial, con el aumento de vehículos de distinto tipo, tanto de servicio público como particulares, contribuyendo al aumento de las emisiones de gases altamente contaminantes para el ambiente y la salud como el dióxido de carbono y que, además, incide notoriamente en el deterioro de las estructuras y edificaciones.

Lo anterior señala que el municipio de Pamplona paso de ser un pueblo solitario, de aire limpio y orden tradicional urbanístico a una ciudad con hacinamiento arquitectónico de edificaciones de cuatro y cinco pisos sin mayores exigencias arquitectónicas y estructurales y, sobre todo, con altos niveles de contaminación.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son las zonas de riesgo por efecto de la carbonatación acelerada en estructuras de concreto reforzado a causa del CO<sub>2</sub> vehicular en el municipio de Pamplona, Norte de Santander?

### 3. JUSTIFICACIÓN

El municipio de Pamplona en los últimos 15 años ha excedido su capacidad vehicular, las emisiones de gases contaminantes han ido en aumento y estos gases en cierta proporción van a parar a las estructuras de concreto causándole daños algunas veces irreparables. Además, el caos vehicular se ha incrementado, sobre todo en la zona céntrica, añadiendo a esto el hecho de las consecuencias que se generan en la salud por la inhalación de estos gases contaminantes derivados del proceso de combustión de los vehículos.

En este orden de ideas la ciudad carece de una estadística de las estructuras enfermas por las patologías de carbonatación y despasivación del acero, del nivel de avance de la lesión y del volumen aproximado de vehículos categorizados que la están produciendo. De igual forma, existe una falta de información respecto a las zonas del municipio donde se genera la mayor cantidad de emisiones de Dióxido de Carbono, principalmente por la influencia del alto flujo vehicular que transita por los corredores viales y las concentraciones de Dióxido de carbono en todo el municipio, teniendo en cuenta la variación altitudinal y las condiciones meteorológicas.

Por lo anterior, se hace necesario determinar las edificaciones representativas que padecen las patologías enunciadas y el grado de lesión, su vulnerabilidad ante los gases y compuestos que se encuentran en el ambiente y las estrategias de salvamento que se pueden aplicar antes de recomendar patología forense. Igualmente, identificar, determinar y evaluar las concentraciones de Dióxido de carbono en el casco urbano del municipio de Pamplona, para el planteamiento de las zonas de riesgo por las emisiones de este gas de efecto invernadero y proponer alternativas, estrategias y nuevos modelos de movilidad vial, con el fin de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y el grado de vulnerabilidad que presentan las estructuras expuestas y los habitantes del municipio, teniendo como apoyo las autoridades competentes y entes territoriales como la secretaria de Planeación del municipio, tránsito y transporte, constructores, entre otros entes.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar las zonas de riesgo por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y su incidencia en el proceso de carbonatación de estructuras de concreto reforzado en el municipio de Pamplona, Norte de Santander.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar el flujo vehicular del casco urbano y los corredores viales nacionales en el municipio de Pamplona siguiendo protocolos estándar.
- Diagnosticar el grado de afectación del Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) sobre los procesos de carbonatación estructural en los corredores viales nacionales del municipio.
- Determinar las concentraciones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en el casco urbano del municipio de Pamplona, teniendo en cuenta la variación altitudinal.
- Elaborar el mapa de zonas de riesgo de CO<sub>2</sub> para el municipio de Pamplona, estableciendo alternativas de protección a las edificaciones afectadas por el proceso de carbonatación.

## 5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA, TÉCNICA Y NORMATIVA

La investigación depende de tres aspectos importantes en la consecución de información que derive en la detección del aumento (situación anormal) de la contaminación generada por el parque automotor de la ciudad de Pamplona y su daño a determinadas estructuras de concreto. Para ello se indican a continuación algunos conceptos básicos, tendenciales y normativos que enmarcan el presente proyecto.

### 5.1 ANTECEDENTES

A nivel internacional, se destacan diversas investigaciones realizadas entorno a procesos de patología estructural y a la influencia de gases contaminantes en el deterioro de edificaciones y estructuras:

- En la península de Yucatán, México, Moreno, Cob y Castro (2004) realizaron mediciones de avance de carbonatación en edificios y en condiciones de laboratorio, reportando que los ciclos de humectación y secado, la distancia a la línea de costa y la humedad relativa son determinantes en dicho proceso (Chávez, Pérez, Reyes y Corvo, 2013).
- En Chile, Carvajal, Silva, Valiente y Vanegas (2007) realizaron una investigación de tipo experimental para estudiar el efecto de la carbonatación acelerada en diversos tipos de cemento chilenos y tres razones agua/cemento que pueden afectar la durabilidad de las estructuras de hormigón armado. Para ello, analizaron los valores de resistencia a compresión, potencial de corrosión y de profundidad de carbonatación. Encontraron que el hormigón con cemento portland siderúrgico (a/c 0,45) y portland corriente presentaron altos valores de resistencia a compresión y mínimos valores de profundidad de carbonatación y determinaron que la resistencia a compresión es un parámetro de comparación importante, pues a mayor resistencia a compresión menor es la penetración del CO<sub>2</sub>, comportamiento inversamente proporcional.
- En el estudio realizado por Segovia et al. (2008), se hizo un análisis de evaluaciones estructurales realizadas entre 1995 y 2005 y de ensayos de exposición en ambientes con niveles de contaminación variados de hormigones de diferentes calidades en la región Centro-Este de Argentina. Los autores midieron la concentración de contaminantes en el aire y semestralmente

determinaron la profundidad de carbonatación, contenido de cloruros y velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos en los hormigones. Los resultados arrojaron que la profundidad de avance del frente de carbonatación se relaciona con la calidad del hormigón, los niveles de contaminación del ambiente de exposición y las condiciones de humedad, lo que evidenció la efectividad de los recubrimientos con materiales acrílicos y poliuretanos como protecciones anti carbonatación.

- Galán et al. (2010) estimaron las cantidades de CO<sub>2</sub> que se reabsorben en los productos derivados del cemento debido al fenómeno de la carbonatación, teniendo en cuenta la composición del cemento, los ambientes a los que están expuestos los materiales, la dosificación del hormigón, la tipología de la estructura y el tiempo. En este estudio realizaron ensayos experimentales y cálculos para determinar las cantidades de CO<sub>2</sub> y recopilaron información secundaria sobre datos de producción y consumo de cemento y hormigón. Los resultados arrojaron que la combinación del CO<sub>2</sub> por carbonatación en los materiales está influenciada por el ambiente de exposición, humedad tipo de cemento, porcentaje de adiciones y sobre todo por la cantidad de CO<sub>2</sub> presente. Además, el tipo de hormigón también afecta de manera importante en la absorción de CO<sub>2</sub>, principalmente por la variación de la porosidad.
- En Madrid, Galán (2011) evaluó la reacción del CO<sub>2</sub> con las fases hidratadas del cemento, su evolución temporal y su distribución espacial en el hormigón, así como la relación con el avance del frente de cambio de pH. Para esto, el autor fabrico pastas de cemento, morteros y hormigones, los cuales se sometieron a diferentes procesos de carbonatación natural, acelerada y supercrítica. Los resultados permitieron establecer las ecuaciones que describen la evolución temporal de los procesos de absorción de CO<sub>2</sub> y el avance del frente de pH en el hormigón. Así mismo, los resultados aclararon algunas de las relaciones existentes entre la disminución del pH y la combinación de CO<sub>2</sub>, fenómenos no siempre simultáneos. Este estudio permitió avanzar en el conocimiento de la carbonatación del hormigón y materiales derivados del cemento desde la perspectiva de la reacción del CO<sub>2</sub> con las fases hidratadas.
- Siguiendo esta línea de investigación, Márquez et al. (2011), simularon la acción agresiva de los iones fundamentales (sulfato, cloruro y magnesio) y los gases agrios presentes en el gas natural (CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S) sobre un cemento API clase H, con el objetivo de observar sus alteraciones fisicoquímicas por la acción

combinada de estos gases y las aguas de formación. Para esto, prepararon varias probetas del material cementante para su inmersión en disoluciones neutras, conteniendo los iones fundamentales en concentraciones fijas. El tiempo de análisis duro más de dos meses. En general, encontraron que los efectos de los gases, en conjunto o por separado sobre la durabilidad del cemento fueron, la formación de carbonato cálcico (ataque del  $\text{CO}_2$ ) y la lixiviación de algunos componentes (ataque del  $\text{H}_2\text{S}$ ).

- Para analizar los daños causados por el  $\text{CO}_2$  al concreto y el hormigón, Parisot, Pérez, Bolognini y González (2014) evaluaron la influencia del recubrimiento protector y decorativo con base en resinas acrílicas en probetas de concreto expuestas en ambientes simulado y urbano en donde existen diferentes concentraciones de  $\text{CO}_2$ . Los resultados determinaron que el recubrimiento protector y decorativo con base en resinas acrílicas retarda significativamente el inicio del proceso de carbonatación, mas no evita la penetración del  $\text{CO}_2$ . Por otra parte, las probetas sin recubrimiento sufrieron un proceso total de carbonatación en ambos ambientes, debido a que la profundidad del daño sufrido abarco toda el área de la probeta.

En Colombia, son pocas las investigaciones y estudios en los que se aborda la problemática de la afectación de estructuras y edificaciones por influencia del Dióxido de Carbono emitido por diferentes fuentes entre las que se destaca el flujo vehicular. En este país, hablar de carbonatación en el concreto es un tema solo de academia y de algunas facultades de Ingeniería Civil; para el grueso de constructores, consultores y contratistas de obra el tema es desconocido o resulta ser un costo innecesario, sin tener el pleno conocimiento sobre las enfermedades, como prevenirla o en el peor de los casos sus consecuencias irreversibles. A continuación, se mencionan algunas investigaciones y estudios realizados en Colombia y a nivel local respecto a esta temática.

- Correa et al. (2008) llevaron a cabo la investigación denominada “Deterioro atmosférico del concreto en ambientes urbanos colombianos de diferente agresividad” en la que estudiaron el comportamiento del concreto, con y sin varillas de refuerzo frente a diferentes ambientes urbanos para analizar la agresividad de tales atmosferas durante cuatro meses de exposición. Los resultados mostraron que el interior de la probeta donde se encontraba alojada la barra de refuerzo aún se conserva en un medio básico, lo que arrojó que el refuerzo no estaba activo, debido también al corto tiempo de exposición.

- Para este mismo año, Estupiñan, Peña, Vásquez y Mejía (2008), investigadores de la Universidad Industrial de Santander, desarrollaron un modelo electroquímico para evaluar el efecto de la carbonatación proveniente del Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico sobre el deterioro de estructuras de concreto en la costa del Pacífico colombiano, específicamente sobre la penetración y el coeficiente efectivo de difusión del ion cloruro en probetas de concreto fabricadas con cemento Portland tipo I y relaciones de agua/cemento: 0.4, 0.5 y 0.6. La profundidad de penetración del frente carbonatado fue determinada con fenolftaleína. Los resultados de esta investigación mostraron que se presenta una influencia marcada en la capacidad de penetración del ion cloruro a través de la matriz cementicia con relación a la carga pasante.
- Otros investigadores como Aperador, Gordillo y Bautista (2013) realizaron técnicas de evaluación de la corrosión del acero, tales como potencial de corrosión, resistencia lineal a la polarización y pulso galvanostático a los concretos de activación alcalina (AAS) y Portland tipo I (OPC). El estudio se realizó empleando modelos de análisis de varianza, aplicando un experimento factorial con tres factores, uno de ellos medida repetida y los otros dos factores corresponden al cementante y la condición de exposición. Los especímenes de concreto OPC expuestos mostraron un potencial de reposo, y una resistencia de polarización y óhmica (condición CO<sub>2</sub>), superiores a los obtenidos en el concreto armado AAS.
- Dentro de este contexto, Aguirre y Mejía (2013) revisaron el estado del conocimiento con respecto a la durabilidad del hormigón, enfatizando en los fenómenos que afectan su durabilidad y generan corrosión del acero de refuerzo; adicional a esto, incluyeron los métodos de prevención y control que se han desarrollado para mitigar este problema en particular los relacionados con técnicas electroquímicas de prevención y rehabilitación, algunas de estas mencionadas en otras investigaciones. De toda la revisión bibliográfica que hicieron, encontraron que las técnicas electroquímicas son métodos efectivos que pueden ser aplicados en diferentes casos, y resaltan las técnicas RE y EEC que son preventivas y útiles para extender la vida útil del acero cuando el efecto sobre este no es altamente significativo, mientras que otras técnicas como PC permite detener el proceso corrosivo. En este caso, la elección final de la técnica o técnicas a aplicar en cada caso es función del análisis del problema o la falla presentada, el conocimiento del estado de la estructura y las facilidades técnicas y económicas de su implementación.

- Por otra parte, Prada (2014) analizo la problemática de la carbonatación relacionada con estructuras como los puentes en la ciudad de Bogotá; realizo pruebas de carbonatación en los puentes vehiculares de las localidades de Usaquén y Fontibón para evidenciar esta patología, luego comparó los resultados obtenidos de la carbonatación con la presencia de CO<sub>2</sub> en el ambiente circundante en cada puente vehicular analizado, y encontró que la localidad de Fontibón presenta un mayor riesgo de carbonatación, hecho directamente relacionado con las concentraciones de CO<sub>2</sub> presentes en esta zona y finalmente, hizo una revisión de la literatura referente a la patología de la carbonatación y sus métodos de mitigación y control.
- Estadísticas de estudios de movilidad para el caso de Pamplona, como el realizado por Callejas y Mariotta (2013) revelan que cerca de los 25000 vehículos que transitan por la ciudad, 18000 son fijos, 5000 usan la ciudad como paso obligatorio hacia otros destinos y aproximadamente 2000 a manera de visita. Todo este flujo vehicular para una población de 100.000 habitantes, obteniéndose una relación per cápita de 4 personas por vehículo y una ocupación vehicular del 87,5 %; esto genera una cantidad importante de contaminantes en el ambiente, en especial de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), directamente responsable de una de las nuevas enfermedades del concreto estructural y del acero de refuerzo; la carbonatación y la despasivación (Broto, 2010).
- Los investigadores Monje y Rodríguez (2016), realizaron una investigación que se basó en la optimización de algunas condiciones de operación del proceso de carbonatación acelerada empleado en el tratamiento de los agregados reciclados de concretos gruesos, y evaluaron algunas propiedades físicas, químicas, de dureza y durabilidad, así como su desempeño en mezclas de concreto para vías vehiculares. Este proyecto se desarrolló en tres etapas. En la primera evaluaron algunos parámetros del proceso de carbonatación acelerada y la influencia del contenido de humedad de los ARC en el proceso de carbonatación. En la segunda etapa, caracterizaron los ARC carbonatados óptimos comparando sus propiedades con relación a agregados naturales y ARC no carbonatados. En la tercera etapa desarrollaron 7 mezclas de concreto para ensayos de resistencia a la comprensión y cálculo de módulos de elasticidad y rotura. Algunos de los resultados indicaron que los parámetros para obtener la fijación óptima de CO<sub>2</sub> al agregado corresponden a temperatura de 23°C, humedad del ARC seco al horno, tiempo de exposición de dos semanas, concentración del CO<sub>2</sub> del 10% y humedad relativa de 65%,

determinación de parámetros que permite establecer el proceso de fijación óptima del CO<sub>2</sub> a los ARC gruesos de manera controlada.

## **5.2 MARCO TEÓRICO**

### **5.2.1 Conceptualización del CO<sub>2</sub> y emisiones por flujo vehicular**

Álvarez (2015), citado por Alandete y Romero (2016), señala que el Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que es el segundo gas de efecto invernadero más emitido, se genera en un 75% por la producción y el uso de combustibles fósiles; es así que para obtener la energía que contienen los combustibles fósiles y convertirla en vapor, electricidad y movimiento, es necesario someter los combustibles al proceso de combustión.

Respecto a las emisiones de compuestos contaminantes por flujo vehicular Saldaña (2016) señala que el efecto de la mala combustión en los motores de los vehículos produce sustancias contaminantes, entre las que se destacan: hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y las macro partículas. En referencia a estas emisiones, los transportes terrestres en los países desarrollados representan entre el 30 y el 90% del total de la producción de estos gases contaminantes; por otra parte, en los países subdesarrollados el porcentaje se incrementa llegando incluso al 98%.

En Colombia, la principal fuente de emisión es el transporte terrestre (vehículos livianos y de carga) por el consumo de diésel y gasolina. El aumento en los últimos años se ha debido a la recuperación de la economía del país y al aumento del comercio. Según el IDEAM et al. (2016), el Dióxido de Carbono emitido por los vehículos equivale al 97,62% de las emisiones totales, donde también se incluyen otros compuestos como el metano y el dióxido de nitrógeno. El sector transporte es el cuarto sector más importante a nivel nacional en términos de emisiones, las cuales en un 90% se deben al uso energético de combustibles fósiles. En Norte de Santander se emite un total de 0,40 MTON de CO<sub>2</sub> eq, valor que es directamente proporcional al valor agregado departamental del sector transporte. En términos de porcentaje, el Dióxido de Carbono se genera en el departamento en un 74,35%, en comparación con el metano (18,11%) y el dióxido de nitrógeno (7,21%). En el caso de Pamplona, se generan en el rango de 71 y 103 KTON de CO<sub>2</sub> eq en emisiones netas (IDEAM et al., 2016).

## 5.2.2 Caracterización del flujo vehicular

El flujo vehicular es la principal fuente de emisión en los sistemas urbanos. Las emisiones generadas por el flujo vehicular dependen de diversos factores que complican su estimación. Se considera que no hay dos vehículos que emitan la misma cantidad de gases contaminantes (Gasteiz, 2007; Berdugo y Ramírez, 2016).

Las emisiones generadas por los vehículos no solo se limitan a las que salen del tubo de escape, también hay que tener en cuenta el escape de gas de los pistones que pueden generar monóxido de carbono e hidrocarburos, el sistema de combustible donde las emisiones pueden emerger desde el carburador, la entrada del aire a la inyección de combustión y el tanque de combustible, emisiones producidas por el desplazamiento del automotor en un camino con polvo o material particulado, el desgaste de los neumáticos, el desgaste de los frenos, entre otros (University College London y Universidad de los Andes, 2013).

Los principales factores de los que dependen las emisiones por flujo vehicular son:

- Factores propios del vehículo como la tipología del vehículo, peso, combustible usado, velocidad de circulación entre otros.
- Factores externos como tramo, tipo de pavimento de la vía, temperatura ambiente.
- Factores personales como la forma de conducir, longitud de los recorridos.

Respecto a la estimación del volumen vehicular que circula por un punto o sector en específico, se debe tener claridad en el volumen esperado o demanda esperada de vehículos que desearan viajar por ese punto o sector en un tiempo determinado. Es así como existe una relación directa entre el volumen (quienes están siendo servidos) y la demanda (quienes esperan a ser servidos) (Sierra y Guevara, 2012). Esta variable se define como el número de vehículos que circulan por un punto determinado durante un intervalo de tiempo dado y puede ser medida a diferentes escalas de acuerdo al periodo de tiempo:

- Escala horaria (TH=Transito horario).
- Escala diaria (TD=Transito diario).
- Escala semanal (TS=Transito semanal).
- Escala mensual (TM=Transito mensual).
- Escala anual (TA=Transito anual).

El Instituto Nacional de Vías (INVIAS) acostumbra a realizar un conteo por año y el periodo de tiempo que selecciona es de una semana. De acuerdo a esto, el valor a determinar es el Tránsito Promedio Diario (TPM) que se define como el volumen total durante un periodo de tiempo específico (en días completos), mayor que un día y menor que un año, dividido entre el número de días de ese periodo. Este valor

representa la medida básica para la planeación, diseño y posterior control de la infraestructura vial y medidas complementarias. Puede presentar variaciones diarias, en las horas pico y valle, variaciones dentro de la hora pico, para la determinación de la capacidad vial como el factor de hora pico (FHP), y otras variaciones como semanal, anual, por sentido, por carril o extraordinarias. (Valencia, 2007).

### **5.2.3 Patología Estructural**

La patología estructural se define como la disciplina de la ingeniería forense que detecta, trata y previene las patologías o daños que se presentan o se podrían presentar en los sistemas de concreto (Avendaño, 2006). Dentro del grupo representativo de patologías en una masa de concreto se citan algunas de ellas:

- **Del orden externo**

Fisuras, Grietas, Fracturas, desprendimientos, pérdida de material, pérdida de verticalidad, deflexión excesiva, humedad, patinas, colapso de secciones, erosión, corrosión, carbonatación, abultamientos, porosidad, abrasión, desgaste, entre otros (Sanjuán y Castro, 2001; López et al., 2004; Toirac, 2004).

- **Del orden interno**

Microfisuras, exudación, carbonatación (interna), despasivación, pérdida de densidad, pérdida de cohesión, reacciones álcali, Acción bacteriana, retracción, expansión de cristales, eflorescencia entre otras (Sanjuan y Castro, 2001; López et al., 2004; Toirac, 2004).

Del amplio listado de enfermedades internas del concreto sobresalen dos en especial que son causadas por el medio ambiente agresivo y que dieron origen a esta investigación, la carbonatación del concreto (externo) y la despasivación del acero (interno), lesiones lentas y silenciosas consideradas más un tabú por los constructores y consultores, pero causante del colapso prematuro de las estructuras cuando no se detecta a tiempo.

Desde el punto de vista humano estas dos patologías son apenas comparables con el cáncer de hueso u osteoporosis, que carcome el interior del hueso dejándole unas cavidades débiles que fallan ante golpes externos. Teóricamente no se tienen datos de estructuras que hayan colapsado por culpa de las dos lesiones estudiadas, ya que se caracteriza por dejar la estructura aparentemente saludable, pero con una falla grave interna imperceptible al ojo humano salvo cuando deteriora el acero de refuerzo, pero estudios recientes indican que los edificios son mucho más

vulnerables a las fuerzas externas en especial a los terremotos y sismos menores cuando se les ha detectado las dos patologías. Eso indica que las fuerzas externas verticales (peso soportado) y las horizontales (cargas laterales) requieren menos acción ante la presencia de la enfermedad, a este aspecto se les conoce en la ingeniería estructural como “vulnerabilidad”.

La Figura 1 representa una doble patología de proceso avanzado de carbonatación y despasivación del acero de refuerzo en una de las seis columnas de apoyo del tanque aéreo de almacenamiento de agua potable del ICBF en la ciudad de Cúcuta. El daño es tan severo que el elemento estructural no tiene reparación, o resultaría muy costosa y tediosa.

**Figura 1** Proceso de carbonatación y despasivación de un elemento estructural



**Fuente:** La Rotta, 2018

En este contexto se considera el concepto **de edificación expuesta**. Una edificación se considera expuesta si en su construcción no se usaron materiales internos y externos para la protección del concreto, en cuyo caso el material está de cara directamente al medio ambiente donde puede llegar con relativa facilidad el contaminante (Figura 2). Una construcción protegida obedece a enchapes, pinturas y acabados especiales que evitan la contaminación de los materiales internos siendo su aseo una tarea sencilla y económica (NSR, 2010; Quintero, Solano y Pandales, 2013).

**Figura 2** Estructura en concreto y mampostería expuesta sin protección



**Fuente:** La Rotta, 2018

### **5.2.3.1 Carbonatación**

La carbonatación ocurre cuando el dióxido de carbono en la atmósfera reacciona con el cemento portland hidratado en el concreto y reduce el pH del concreto aproximadamente a un valor cercano a 9. Cuando el pH en el fluido de los poros en el concreto está por encima de cierto valor, se forma una barrera protectora pasiva en la superficie del refuerzo (NSR, 2010).

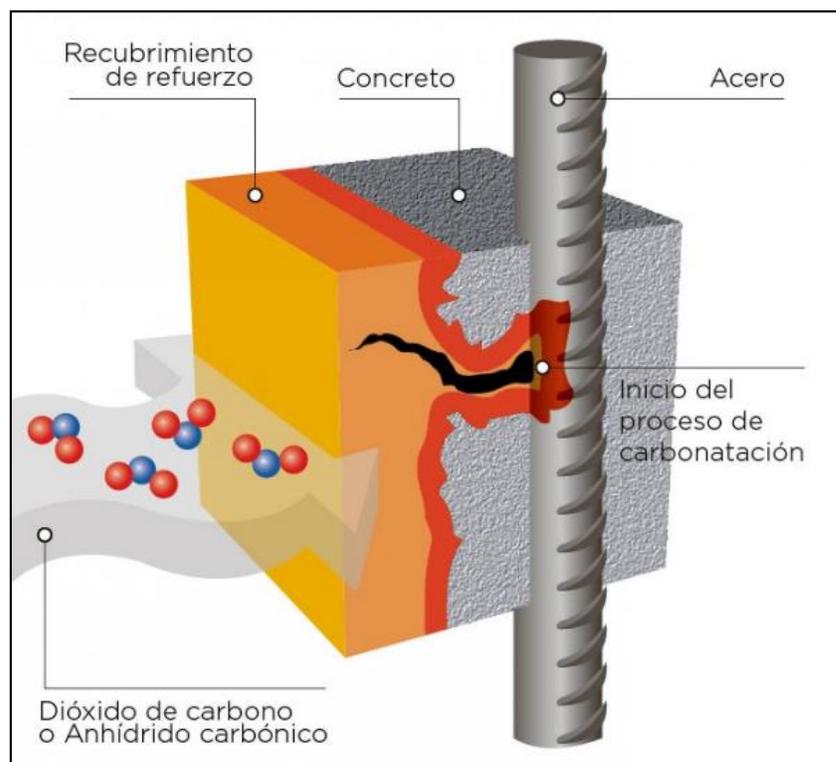
La carbonatación del concreto es una enfermedad que ataca al concreto aun en estado fresco (primeras horas), el responsable del ataque es el dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  como gas presente en el medio ambiente que ataca los componentes alcalinos en la fase acuosa del concreto como pasta. Realmente este ataque se hace sobre el cemento los demás materiales no son atacados por el gas (triturado, arena, agua y aditivos). Del mismo modo, la alta alcalinidad del hormigón, que funda la formación de una capa de óxidos pasivantes sobre el acero, es debida principalmente a la portlandita formada durante la hidratación de los compuestos anhidros del cemento y a los hidróxidos de sodio y potasio presentes. Estas sustancias sitúan el pH de la fase acuosa del hormigón contenido en los poros en valores entre 12,6 y 14, en la escala de pH (Galán 2011; Calvo y Sierra, 2015).

La reacción química responsable disminuye la alcalinidad del material reduciéndole considerablemente su pH, que para el material debe ser preferiblemente mayor a 12.5 al generarse esta zona neutralizada hace aparición la carbonatación y el posterior ataque al acero de refuerzo (López et al., 2004; Avendaño, 2006). En esta fase, las moléculas de  $\text{CO}_2$  penetran en el hormigón a través de los poros capilares no saturados de agua y posteriormente se disuelven en la fase acuosa contenida

en ellos. Los iones  $\text{CO}_3$  generados reaccionan con los iones  $\text{Ca}_2$  presente formando carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) (Calvo y Sierra, 2015).

Durante la carbonatación, los componentes de hidróxido de calcio ( $\text{CaOH}_2$ ) de la pasta de cemento reaccionan con el ácido carbónico leve creado cuando el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) se disuelve en el agua atrapada en los poros del hormigón. El hidróxido de calcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (con alto pH) pasa a carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$  el cual tiene un pH más neutral (Sullivan, William y Dowding, 2007; ARGOS, 2012; Calvo y Sierra, 2015). En la Figura 3 se muestra la representación gráfica del proceso de carbonatación.

**Figura 3** Proceso de carbonatación



Fuente: Álvarez C (2017)

Según Montani (2000), entre los principales factores que afectan la carbonatación se encuentran:

- **Contenido de humedad del concreto.** La humedad relativa influye en el avance de la reacción de carbonatación. A humedad más baja, no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelvan cantidades significativas de hidróxido de calcio.
- **Permeabilidad del concreto.** La relación entre la permeabilidad del concreto y la carbonatación es directamente proporcional. El concreto permeable se

carbonatará rápidamente.

- **Recubrimiento del concreto y defectos de superficie.** Un recubrimiento bajo del concreto y defectos de superficie como grietas y pequeños hoyos proporcionan una ruta directa al acero de refuerzo.

#### 5.2.3.1.1 Medición del proceso de carbonatación

Como se ha mencionado, la patología puede demorar poco o mucho tiempo dependiendo de la calidad del concreto (López et al., 2004; Aguirre y Mejía 2013). Teóricamente se usa la expresión encontrada por Shiessi (Ecuación 1):

$$X_c = K_c \cdot (T)^{1/2} \quad E_c (1)$$

Donde,

$X_c$ , es la medida del frente carbonatado en mm

$K_c$ , es una constante de carbonatación medida en mm/año<sup>1/2</sup>

$T$ , es el tiempo de vida útil en años calculado por el diseñador de la estructura

De la ecuación anterior se calcula el tiempo que demoraría el elemento estructural en llegar a su vida útil. En campo se toma la medida al frente carbonatado expresado en la ecuación como  $X_c$ .

#### 5.2.3.1.2 Toma en campo del frente carbonatado

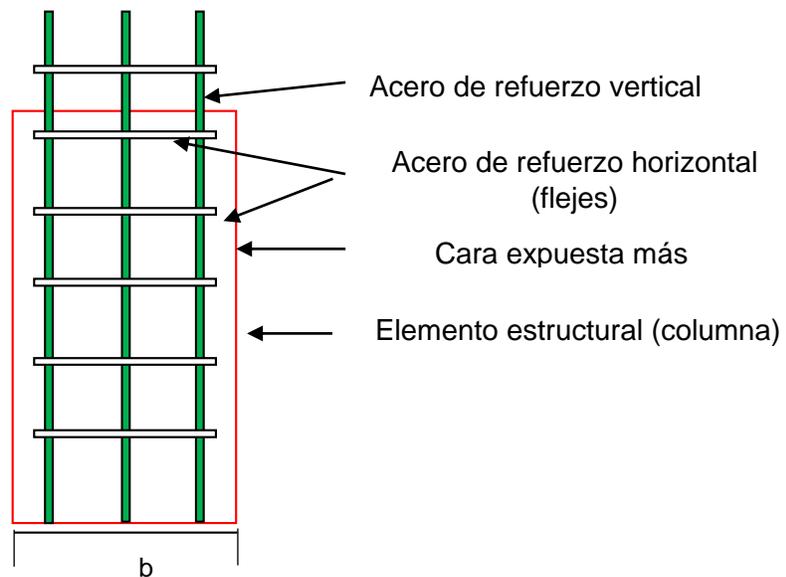
Esta labor consiste en medir la profundidad transversal contaminada al eje del elemento de las caras expuestas de concreto al medio ambiente. El proceso sigue los siguientes pasos:

1. Seleccionar por parte del patólogo el elemento estructural de concreto reforzado que se considere afectado el cual será analizado.
2. Determinar el punto exacto del elemento donde se hará la medición, en función de su altura, espesor, forma, nivel de exposición y nivel de poros
3. Realizar una perforación con método mecánicos (broca) o manual mediante una abertura donde se esponga el material.
4. Limpiar mediante bombín o brocha los residuos de la perforación para eliminar impurezas y permitir la acción rápida del agente visualizador.

5. Aplicar a la perforación mediante atomización solución de Fenolftaleína al 2% y dejar reaccionar por unos segundos.
6. Medir con un calibrador la distancia en milímetros entre la cara expuesta del elemento estructural y el sitio promedio de la perforación donde empieza a aparecer una tonalidad purpura.
7. Registrar en una tabla de control las mediciones para las diferentes perforaciones las cuales reciben el nombre de frente carbonatado.

En la Figura 4 se muestra una representación preliminar del elemento estructural a intervenir. Representa el detalle de una columna de concreto reforzado de 40 centímetros de ancha (sección  $b$  de la Columna) armada con tres barras de acero por cada lado (seis varillas de acero) previamente escogida y a la que se le va a intervenir una de sus caras para realizar el proceso de carbonatación.

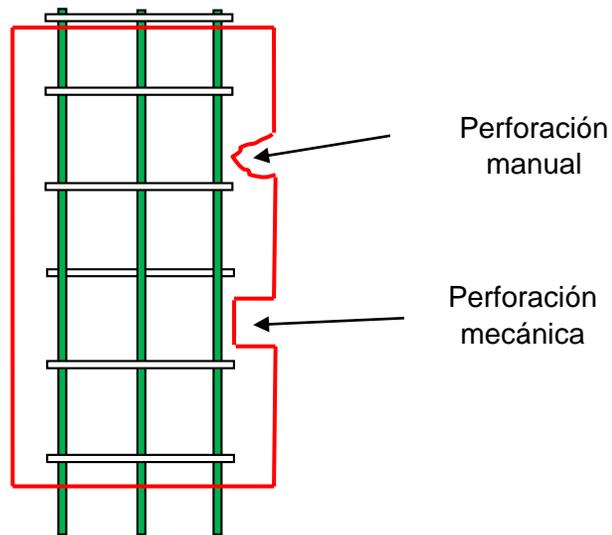
**Figura 4** Presentación preliminar del elemento estructural a intervenir



**Fuente:** La Rotta, 2018

En la Figura 5 se muestra la representación del elemento estructural perforado.

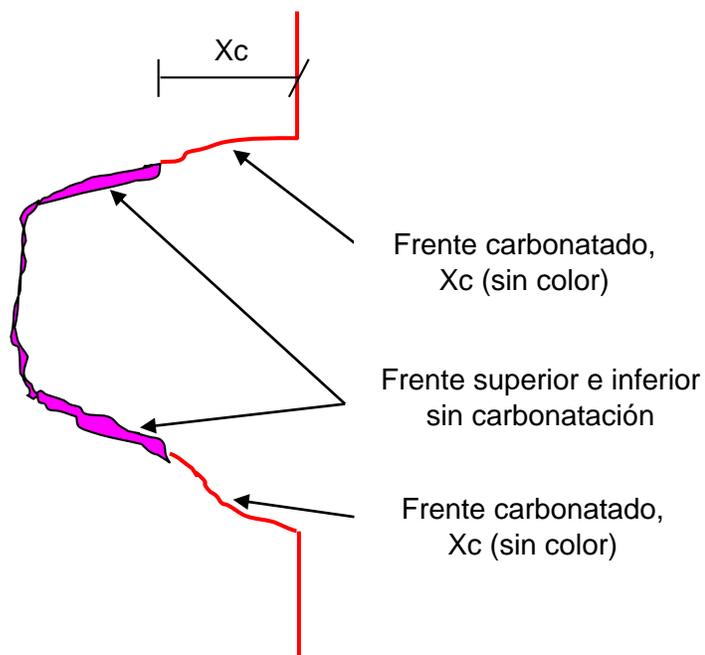
**Figura 5** Elemento estructural perforado.



**Fuente:** La Rotta, 2018

En la Figura 6 se aprecia las manchas color púrpura dejadas por la reacción de la fenolftaleína con el cemento. Cuando no aparece color la zona se considera entonces lesionada con presencia de carbonatos.

**Figura 6** Posición del frente de carbonatación



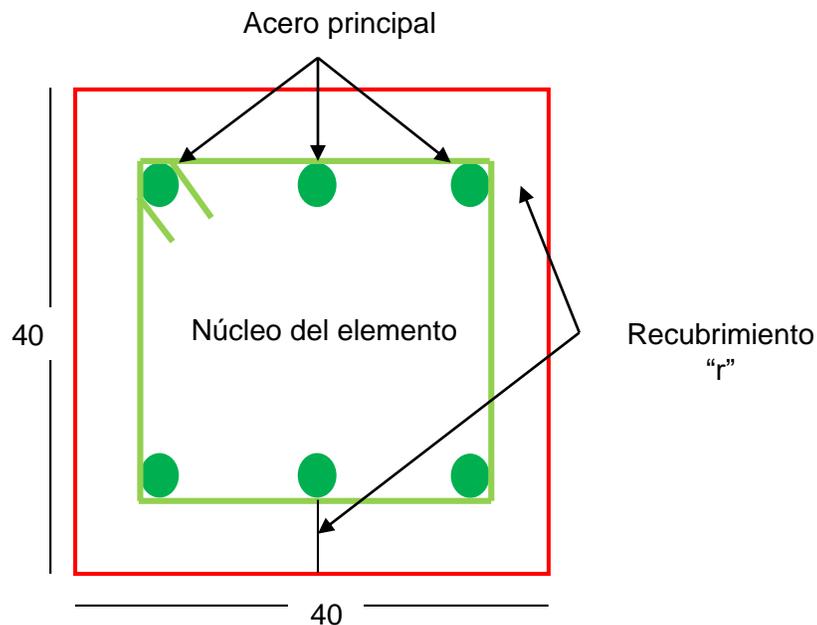
**Fuente:** La Rotta, 2018

### 5.2.3.1.3 Frente máximo permitido de carbonatación

La Norma sismo resistente no permite la presencia de carbonatación toda vez que es el inicio de una lesión que deteriorará inminentemente el elemento. No obstante, se permiten ciertas tolerancias cuando el proceso se ha detectado a tiempo. En términos patológicos el frente carbonatado no puede ir más allá del recubrimiento, que es considerado la distancia máxima entre la cara expuesta del elemento y el acero de refuerzo principal. De ahí en adelante la presencia de la patología no debe ser considerada para reparaciones, por lo tanto, frentes que hayan superado el “recubrimiento” y estén en la zona del núcleo generan patología forense (demolición inmediata del elemento estructural).

En la Figura 7 se muestra la representación de la sección cuadrada de un elemento estructural tipo columna.

**Figura 7** Sección cuadrada de un elemento estructural tipo columna



**Fuente:** La Rotta, 2018

La NSR-10 permite usar recubrimientos de 2.5, 4.0, 5.0 y 7.5 cm para elementos expuestos dependiendo del grado de agresividad del medio. No obstante, el calculista determina que espesor usar de acuerdo a factores dentro de la misma normatividad, el clima, nivel de exposición y uso previsto para la construcción (NSR, 2010).

### **5.2.3.2 Despasivación**

Existe una sinergia del concreto con el acero de refuerzo, que se basa en que el concreto provee al refuerzo de una protección tanto química como física contra la corrosión. La protección química se debe a la alcalinidad del concreto, la cual produce una capa de óxido en la superficie del acero, impidiendo que continúe corroyéndose, fenómeno que se conoce como pasividad (Peña, Estupiñan, Vásquez y Mejía, 2011), puesto que la capa de óxido evita la propagación de la corrosión del acero. La corrosión del acero suele ser una de las principales causas de deterioro del concreto en estructuras de concreto reforzado expuestas a factores ambientales.

El concreto también funciona como una capa física protectora contra los agentes ambientales como el agua, oxígeno, cloruros y el dióxido de carbono que pudieran despasivar el acero e iniciar su corrosión (Mindess y Young, 1981; Fontana, 1986; Peña, Estupiñan, Vásquez y Mejía, 2011).

El hormigón constituye un medio perfecto de conservación del acero, pues le proporciona una película muy fina (microscópica) de óxido y muy adherente, llamada capa de pasivación, cuyo alto índice de alcalinidad (pH de 12 a 14) impide la corrosión del acero (López et al., 2004). Cuando el pH de esta capa desciende por debajo de 9, el acero queda totalmente desprotegido y expuesto.

López et al. (2004) mencionan que, cuando se produce la infiltración a través de fisuras (o a través de los capilares) de algún tipo de agente, se produce la despasivación, que desprotege a la armadura y provoca la corrosión del acero. Los principales procesos que atacan la capa de pasivación son:

- La carbonatación del hormigón, que provoca una corrosión generalizada.
- La presencia de cloruros, que provoca corrosión puntual y localizada.
- La sulfatación del hormigón, que es muy poco frecuente.

## **5.3 MARCO LEGAL**

En el contexto, mucha de la teoría contenida en la norma para el tema de materiales de construcción es de origen americano con laboratorios de prueba muy estrictos y con estándares altísimos de calidad. Esto resulta ser el primer inconveniente a la hora de construir, pues en Colombia y en el área de Pamplona el control de calidad de los materiales y de los protocolos con el respeto de la norma es muy bajo y está en manos de personas que poco o nada hacen por implementar las medidas de construcción segura.

De otra parte, las oficinas de Planeación Municipal, quienes tienen la obligación técnica de revisar los diseños de estructuras no realizan la tarea de manera eficiente y complementada, debido a que los presupuestos de estas dependencias no asignan los fondos suficientes para contratar personal idóneo que revise exhaustivamente los planos y memorias de cálculo.

El marco normativo en el que se enmarca la presente investigación y que comprende decretos, leyes y normas vigentes que articulan y dictaminan los aspectos referentes a análisis de tránsito vehicular, patologías estructurales y emisiones de contaminantes atmosféricos se define a continuación:

- Ley 769 de 2002 por la cual se expide el Código Nacional de Tránsito Terrestre y se dictan otras disposiciones. Esta ley regula la circulación de los peatones, usuarios, pasajeros, conductores, motociclistas, ciclistas, agentes de tránsito y vehículos por las vías públicas o privadas que están abiertas al público, o en las vías privadas, que internamente circulen vehículos; así como la actuación y procedimientos de las autoridades de tránsito.
- Resolución 910 de 2008 por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disposiciones. Esta resolución establece los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes que deben cumplir las fuentes móviles terrestres, reglamenta los requisitos y certificaciones a las que estén sujetos los vehículos y demás fuentes móviles, sean importadas o de fabricación nacional.
- Ley 1383 de 2010, por la cual se reforma la ley 769 de 2002-Código Nacional de Tránsito y se dictan otras disposiciones.
- La Norma Sismo Resistente NSR-10 es un documento de la ley 400 de 1997 revisado y adoptado por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC cuya autoría y derechos le pertenecen a la American Concrete Institute (ACI). En términos generales es un documento muy bien obtenido y sustentado con una exquisitez técnica y matemática en fórmulas, ecuaciones, tablas, especificaciones y recomendaciones para que los diseñadores, constructores e interventores de estructuras de concreto reforzado realicen de manera eficiente, ordenada, precisa, segura y económica la construcción de estructuras de diversos materiales. Respecto a carbonatación, la NSR-10 expresa lo siguiente:
  - La Norma sismo resistente no permite la presencia de carbonatación toda vez que es el inicio de una lesión que deteriorará inminentemente el elemento. No obstante, se permiten ciertas tolerancias cuando el proceso se

ha detectado a tiempo. En términos patológicos el frente carbonatado no puede ir más allá del recubrimiento, que es considerado la distancia máxima entre la cara expuesta del elemento y el acero de refuerzo principal. De ahí en adelante la presencia de la patología no debe ser considerada para reparaciones, por lo tanto, frentes que hayan superado el “recubrimiento” y estén en la zona del núcleo generan patología forense (demolición inmediata del elemento estructural).

- La NSR-10 permite usar recubrimientos de 2.5, 4.0, 5.0 y 7.5 cm para elementos expuestos dependiendo del grado de agresividad del medio. No obstante, el calculista determina que espesor usar de acuerdo a factores dentro de la misma normatividad, el clima, nivel de exposición y uso previsto para la construcción.

#### **5.4 MARCO CONTEXTUAL**

El municipio de Pamplona se encuentra ubicado sobre la cordillera central, al Nororiente de Colombia. Su localización geográfica hacia el suroccidente del departamento Norte de Santander es del 7°22'41" de latitud Norte y 72°39'09" de longitud Oeste. Pertenece a la región sur occidental del departamento junto con los municipios de Pamplonita, Chitagá, Silos, Cacota y Mutiscua (PBOT, 2015).

El municipio de Pamplona se encuentra a 75 kilómetros de San José de Cúcuta y a 124 kilómetros de la ciudad de Bucaramanga. Además, cuenta con las siguientes vías de comunicación terrestre:

Vías primarias o nacionales

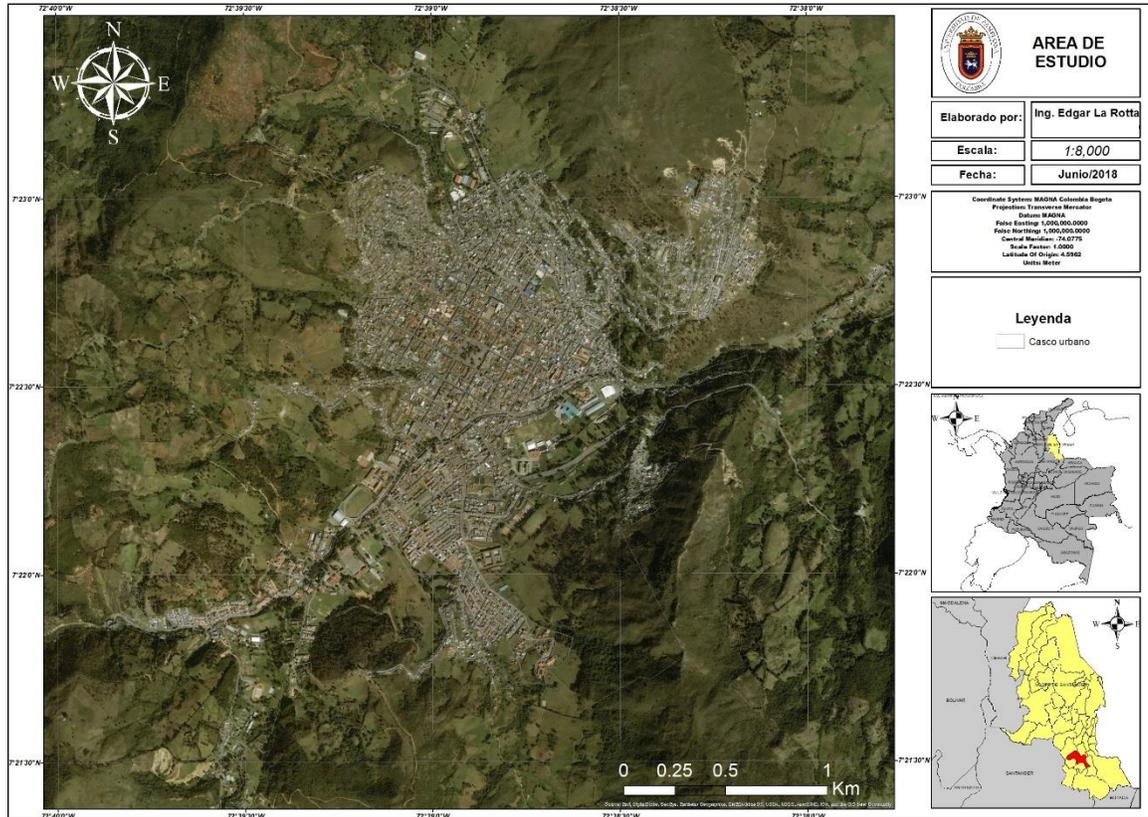
- Pamplona-Cacota-Chitagá-Presidente-Málaga-Bogotá.
- Pamplona-La Laguna-Berlín-Bucaramanga-Bogotá o Costa Atlántica.
- Pamplona-El Diamante-Cúcuta.

Vías secundarias o departamentales:

- Ramal a Cacota
- Pamplonita-La Lejía-La Cabuya.
- Chitagá-Babega.
- La Laguna-Silos-Chitagá.
- Ramal a Mutiscua.
- Ramal a Pamplonita.

En la Figura 8 se presenta la localización general del municipio de Pamplona, Norte de Santander.

**Figura 8** Localización general municipio de Pamplona, Norte de Santander

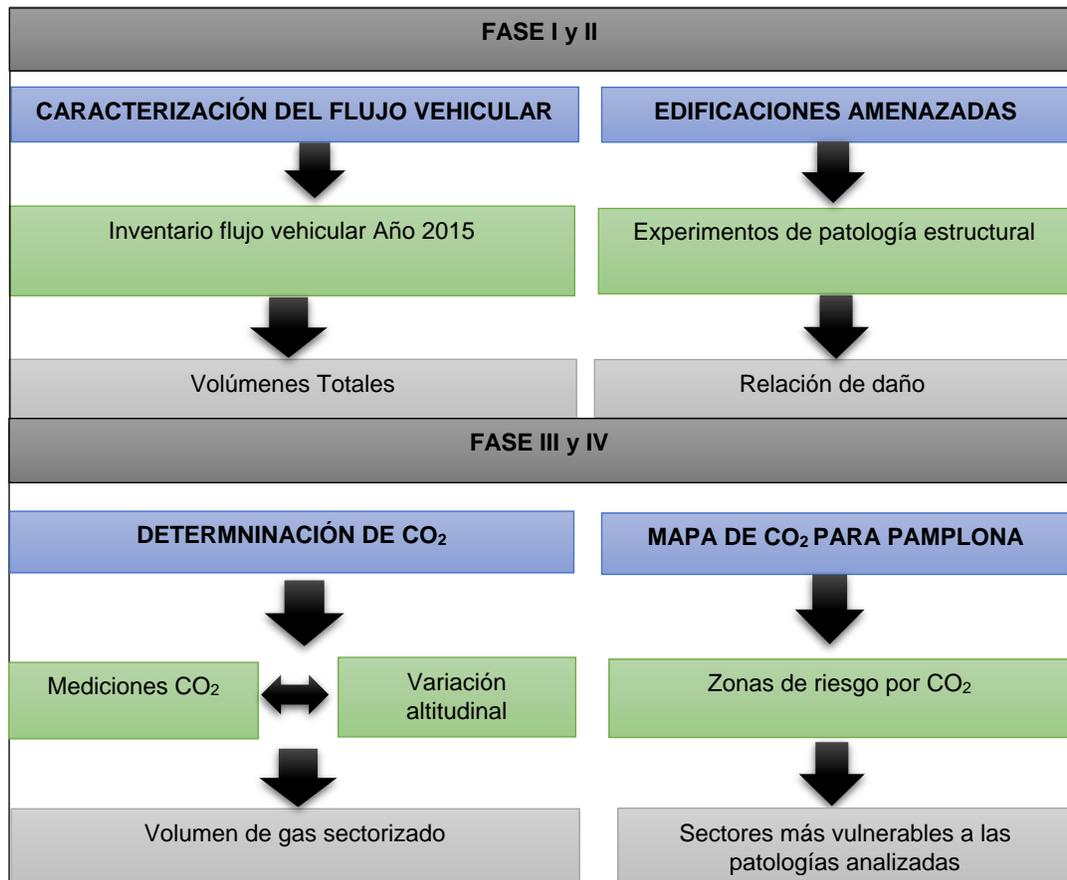


Fuente: La Rotta, 2018

## 6. ESTRUCTURACIÓN Y DESARROLLO METODOLÓGICO

La investigación se desarrolló en cuatro escenarios para determinar los valores y comportamientos de la información obtenida. En la Figura 9 se presenta la estructura metodológica establecida.

**Figura 9** Metodología de la Investigación



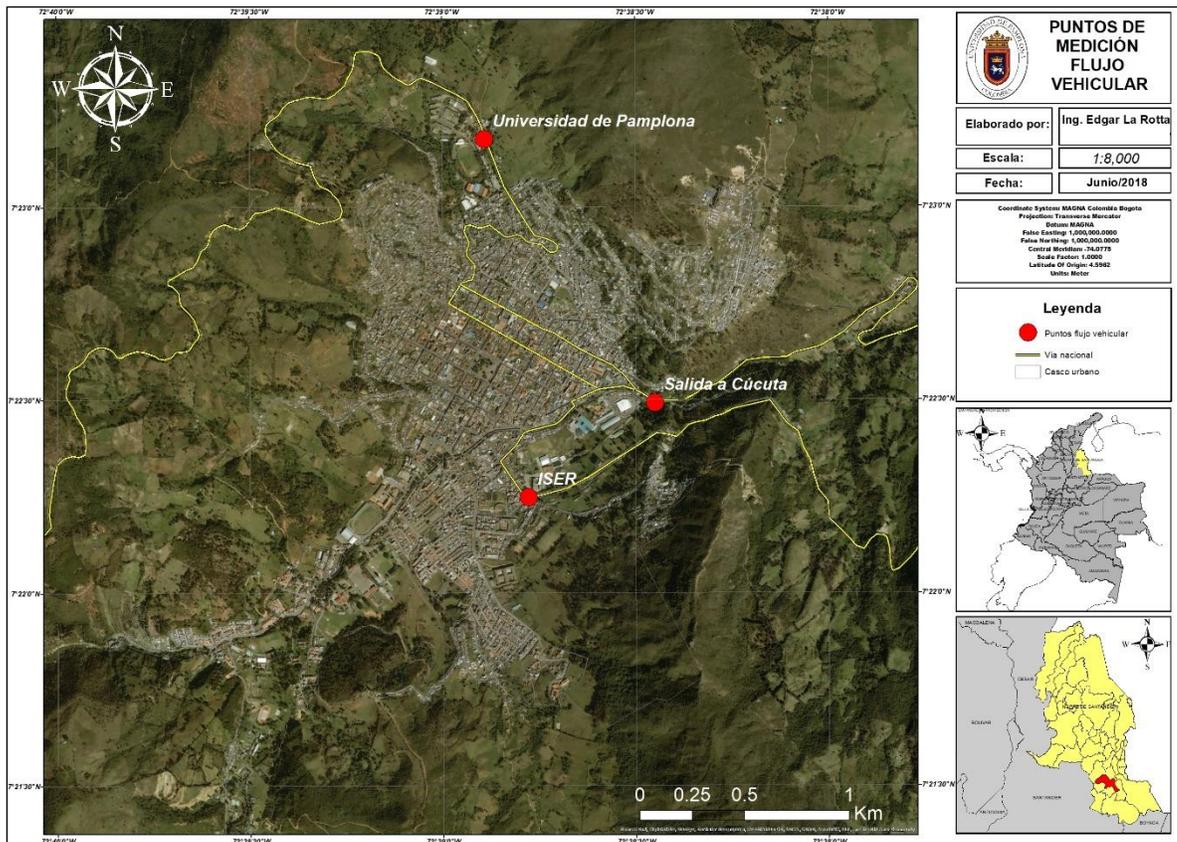
**Fuente:** La Rotta, 2018

A continuación, se describen las fases en que se estructuró la metodología de la presente investigación.

### 6.1 Fase I. Caracterización y cuantificación del flujo vehicular

El Ministerio de Transporte provee de una serie de protocolos para que las entidades públicas o privadas realicen estudios asociados a la movilidad y sean considerados como oficiales para que en su lectura e interpretación se hable un solo lenguaje. Para el desarrollo de la presente investigación era preciso determinar la cantidad de vehículos en un momento dado en el sector donde se realizarían las demás pruebas, los corredores viales escogidos fueron las salidas del municipio de Pamplona hacia las Rutas Nacionales. En la Figura 10 se presenta la localización general de los puntos de aforo de flujo vehicular.

**Figura 10** Localización general puntos de aforo de flujo vehicular



**Fuente:** La Rotta, 2018

La mecánica del ejercicio consistió en ubicar en los sitios señalados, un grupo de hasta cuatro aforadores para la toma de información acerca del tipo y número de vehículos que circulaban por el sector en turnos de cuatro horas durante 24 horas continuas. Estas planillas se ingresaron posteriormente a un modelo sistematizado donde arrojaba la estadística necesaria para hacer correlaciones con los volúmenes del gas contaminante. El procedimiento de los aforos vehiculares realizados se describe a continuación:

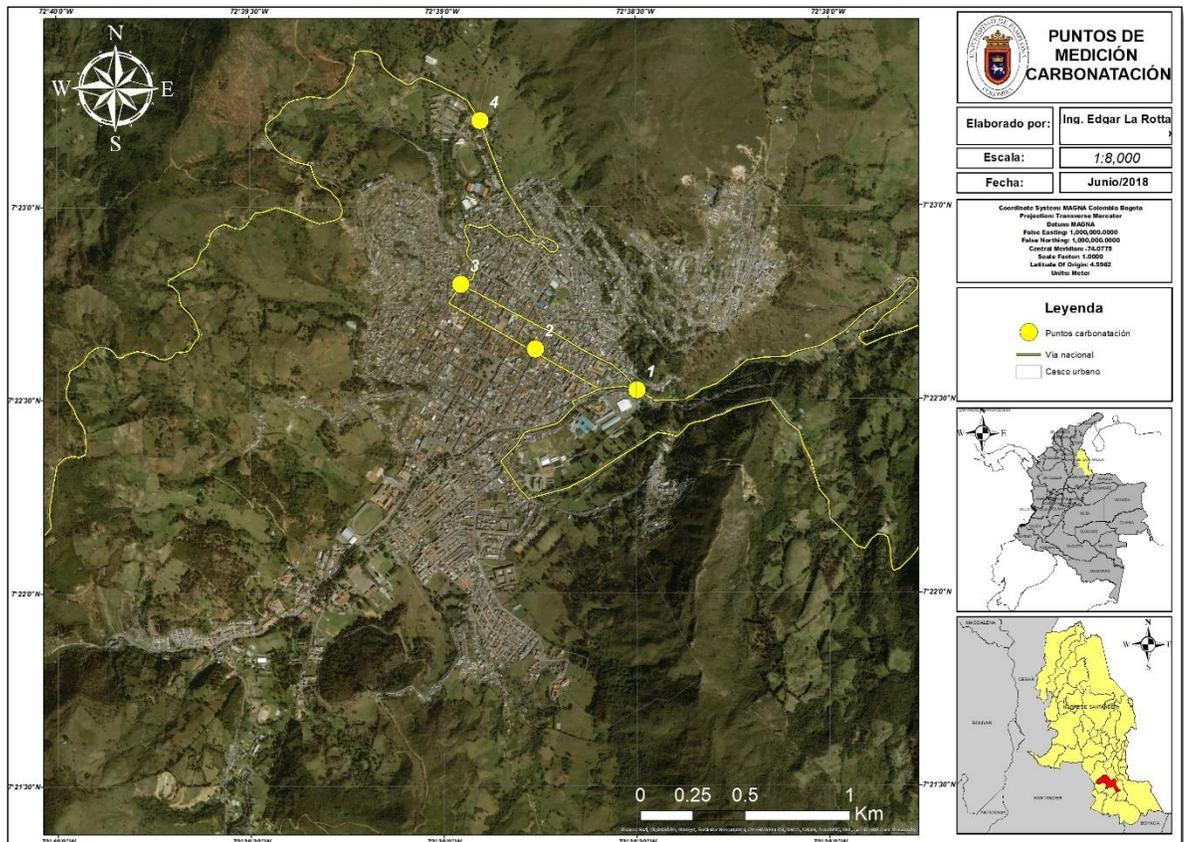
El conteo se realizó durante la semana del 28 de mayo al 04 de junio de 2015 para determinar las posibles variaciones en los flujos totales. Este estudio se profundizó con un aforo de vehículos durante 24 horas para siete días, en periodos continuos de cuatro horas. Esta información nocturna era clave para obtener el número de carros que circulaban de noche y su incidencia sobre los procesos de contaminación.

## 6.2 Fase II. Análisis de edificaciones amenazadas

En esta fase se realizaron experimentos de patología estructural para la identificación de las relaciones de daño, asociadas a la influencia del CO<sub>2</sub>, sobre las estructuras que se apostan en los 3 principales corredores viales del municipio.

La actividad consistió en seleccionar estructuras representativas de concreto reforzado que se ubicaran a lo largo de los corredores viales analizados para practicarles prueba de carbonatación y en lo posible de despasivación. Los resultados obtenidos de los frentes de carbonatación se cuantificaron en periodos semestrales, iniciando el proceso de medición en el año 2014.

**Figura 11** Localización general de los puntos de medición de carbonatación



Fuente: La Rotta, 2018

En la Figura 11 se presenta la localización general de los puntos de medición de carbonatación, de acuerdo a las especificaciones que se tuvieron en cuenta para dichas mediciones y pruebas. El primer punto se localizó en la salida hacia la ciudad de Cúcuta, el segundo punto se ubicó en la calle 4 (vía nacional) en cercanías al Palacio de Justicia, el tercer punto se localizó sobre la vía nacional en el barrio San

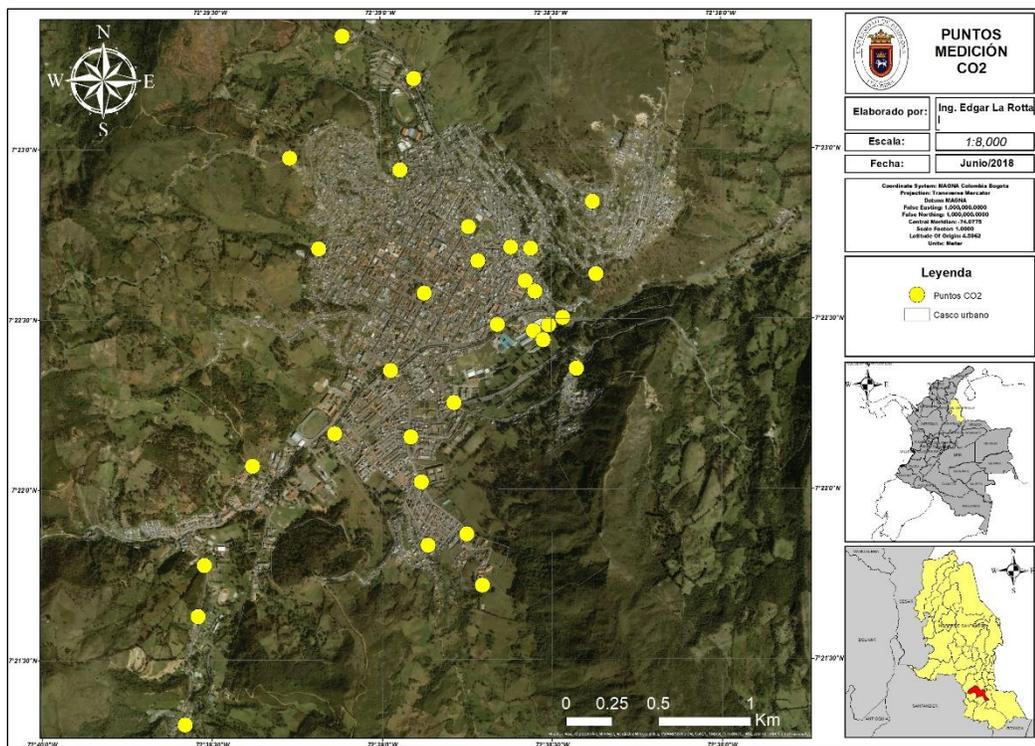
Ignacio y, finalmente, el cuarto punto se localizó sobre la vía que conduce a la ciudad de Bucaramanga en cercanías a la Universidad de Pamplona.

### 6.3 Fase III. Determinación del Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

En esta fase se midió la concentración del CO<sub>2</sub> en unos puntos estratégicos distribuidos a lo largo del corredor vial estudiado, teniendo en cuenta la variación altitudinal y las condiciones climáticas. Para tal propósito se contó con un equipo portátil de medición de CO<sub>2</sub> suministrado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad de Pamplona. El equipo usado corresponde a un medidor portátil de CO<sub>2</sub> marca Lutron.

En cada punto de medición se tomó lectura en intervalos de cada 5 minutos para cada variable analizada (Dióxido de carbono y Temperatura ambiente). En la Figura 12 se presenta la ubicación de los puntos de medición de Dióxido de Carbono y temperatura en el municipio de Pamplona.

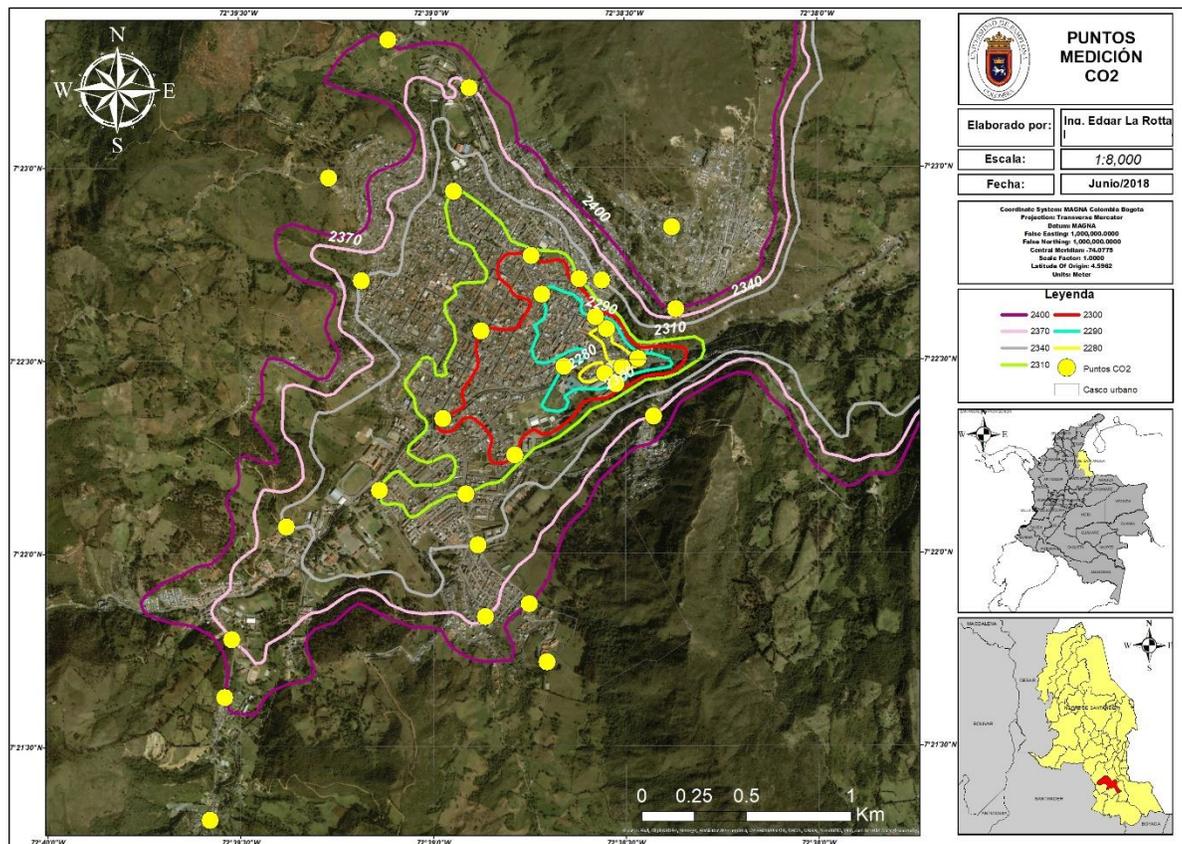
**Figura 12** Ubicación puntos de medición de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)



Fuente: La Rotta, 2018

En la Figura 13 se presenta la localización de los puntos de medición de Dióxido de Carbono en el municipio de Pamplona teniendo en cuenta la variación altitudinal (curvas de nivel). Por cada curva de nivel se tomaron cuatro puntos de medición, de acuerdo a la orientación (Norte, Sur, Este, Oeste) y con esto, se registraron tres mediciones de CO<sub>2</sub> y temperatura en cada orientación en intervalos de 5 minutos como se mencionó anteriormente. En total se realizaron dos monitoreos durante los meses de abril y mayo del presente año.

**Figura 13** Puntos de medición de Dióxido de carbono por curva de nivel



**Fuente:** La Rotta, 2018

En la Tabla 1 se presentan los puntos estratégicos seleccionados donde se realizaron las mediciones de Dióxido de Carbono en el municipio de Pamplona. Los números que se ubican al lado de cada punto seleccionado representan el orden de la ruta seguida para la medición en todo el municipio.

**Tabla 1** Puntos estratégicos de medición de CO<sub>2</sub>

<b>PUNTOS DE MEDICIÓN [CO<sub>2</sub>]</b>				
<b>CURVA DE NIVEL</b>	<b>NORTE</b>	<b>ESTE</b>	<b>SUR</b>	<b>OESTE</b>
<b>2280 m.s.n.m.</b>	Abajo Colegio San Francisco (6)	Hotel Coopmotilon (5)	Terminal de Transportes (3)	Centro de Acopio (2)
<b>2290 m.s.n.m.</b>	Plazuela Bolívar (8)	Colegio San Francisco (7)	Urbanización terminal (4)	Hospital (1)
<b>2300 m.s.n.m.</b>	Parque Central (19)	Colegio Galán (9)	Bomba ISER (20)	Puente Topón (27)
<b>2310 m.s.n.m.</b>	Curva Semáforo (17)	Detrás del Cementerio (10)	Parque Los Enamorados (22)	Puente Estadio (28)
<b>2340 m.s.n.m.</b>	Colegio Brighton (18)	Arriba 2310E (11)	Seminario Mayor (23)	Quebrada Jurado (29)
<b>2370 m.s.n.m.</b>	Entrada Unipamplona (14)	Barrio El Progreso (21)	Cancha San Pedro (24)	Detrás Colegio Normal (30)
<b>2400 m.s.n.m.</b>	Bomba Bucaramanga (15)	Simón Bolívar (12)	Barrio Las Colinas (25)	Jardín Infantil (31)
<b>2500 m.s.n.m.</b>	Palos Blancos (16)	Cristo Rey (13)	Casa de Nazaret (26)	Los Tanques (32)

**Fuente:** La Rotta, 2018

Como parte de complemento a esta fase se elaboraron mapas de concentraciones de Dióxido de Carbono para el municipio de Pamplona empleando Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS), teniendo en cuenta la variación altitudinal (curvas de nivel), periodo de monitoreo, orientación de la medición, entre otros factores.

#### **6.4 Fase IV. Mapa de riesgo de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) total para Pamplona**

En esta fase se tomaron los valores de CO<sub>2</sub> determinados en la etapa anterior y se evaluaron las zonas más contaminadas en el municipio y con esta información se elaboró el mapa de riesgo por CO<sub>2</sub>, que da las indicaciones de alerta a los constructores y oficina municipal de planeación sobre los sitios de mayor concentración del contaminante y que se constituyen en los más vulnerables a las patologías estructurales. El mapa de riesgo se elaboró por rangos de concentraciones de CO<sub>2</sub>, teniendo en cuenta las más perjudiciales y las más leves.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la presente investigación de acuerdo a las fases de desarrollo propuestas para el cumplimiento de los objetivos planteados, así como las variables a analizar y discutir en cada una de ellas.

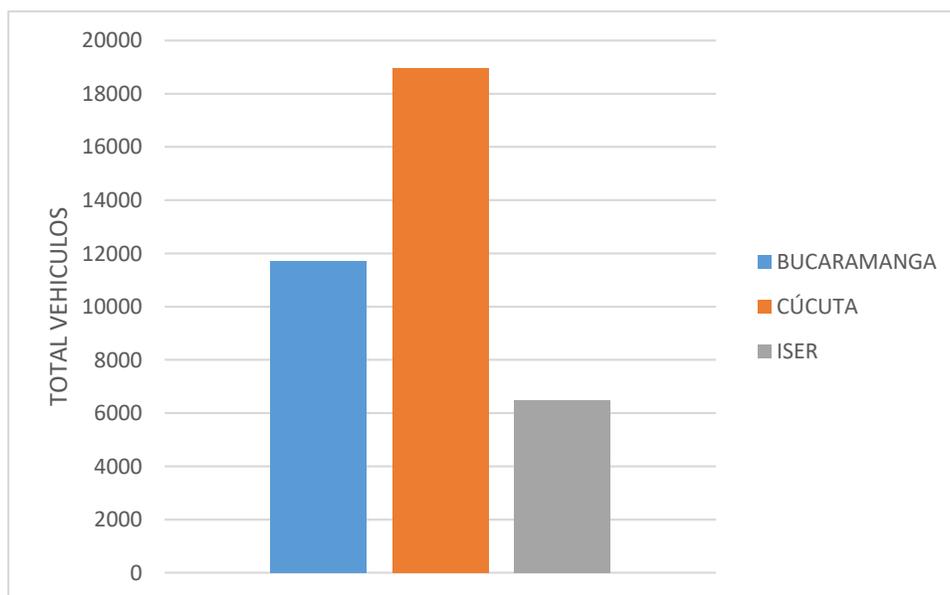
### 7.1 Caracterización y cuantificación del flujo vehicular

La caracterización y cuantificación del flujo vehicular que circula por los principales corredores viales del municipio de Pamplona se realizó en el año 2015 en un periodo de una semana según lo establecido por el INVIAS. Los resultados obtenidos de la caracterización del flujo vehicular y los volúmenes totales de vehículos circulados en este periodo se describen a continuación.

Para obtener los resultados de la caracterización y cuantificación del flujo vehicular del año 2015 se procesó la información primaria recolectada para realizar los conteos totales del número de vehículos transitados por cada corredor vial principal.

En la Figura 14 se presenta la cuantificación total de los vehículos que transitaron por los principales corredores del municipio de Pamplona durante el periodo de aforo.

**Figura 14** Total de vehículos transitados durante el periodo de aforo



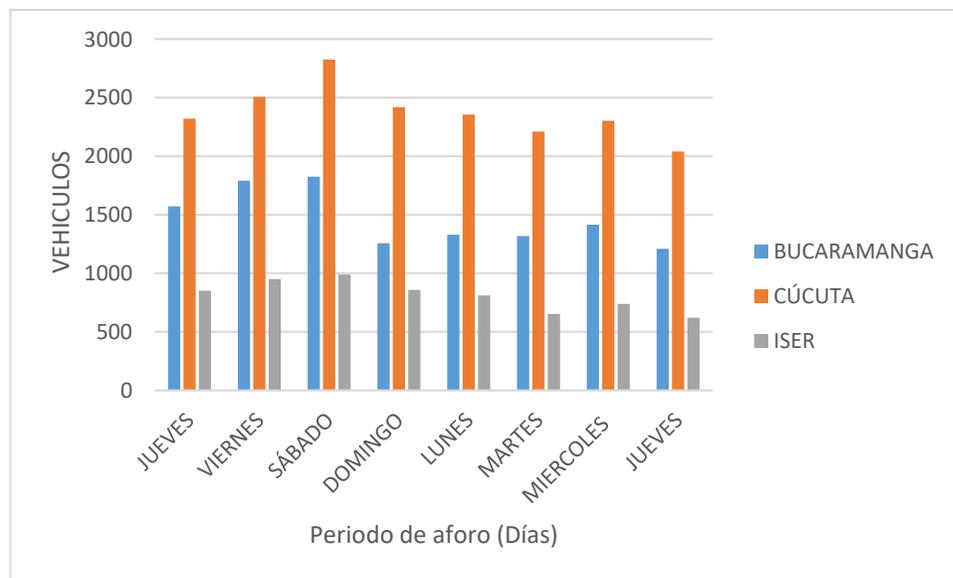
Fuente: La Rotta, 2018

Como se observa, en la estación ubicada a un costado de la vía a Cúcuta se presentó el mayor número de vehículos transitados de distinto tipo, seguido de la estación ubicada a un costado de la vía a Bucaramanga. Por otra parte, se presentó una diferencia significativa entre el total de vehículos transitados por la estación ISER y las otras dos estaciones, puesto que durante el periodo de aforo se presentó un represamiento del flujo vehicular sobre la vía a Saravena a causa de un deslizamiento de tierra que tuvo incomunicada la vía por varios días, generando una disminución considerable en el número de vehículos transitados que llegaban al municipio.

La gran cantidad de autos circulados en general da cuenta del crecimiento gradual del parque automotor en el municipio y de la influencia de los municipios localizados en la provincia y sobre las vías principales. Se registraron un total de 37173 vehículos durante todo el periodo de aforo, indicando un valor considerable, teniendo en cuenta las condiciones de tránsito, topográficas, ambientales, sociales y económicas del municipio de Pamplona y el exceso en la capacidad de albergar un flujo vehicular que va aumentando con el tiempo.

En la Figura 15 se presenta el volumen de vehículos que circularon durante el periodo de aforo vehicular en las tres estaciones de aforo.

**Figura 15** Volumen de vehículos transitados durante el periodo de aforo



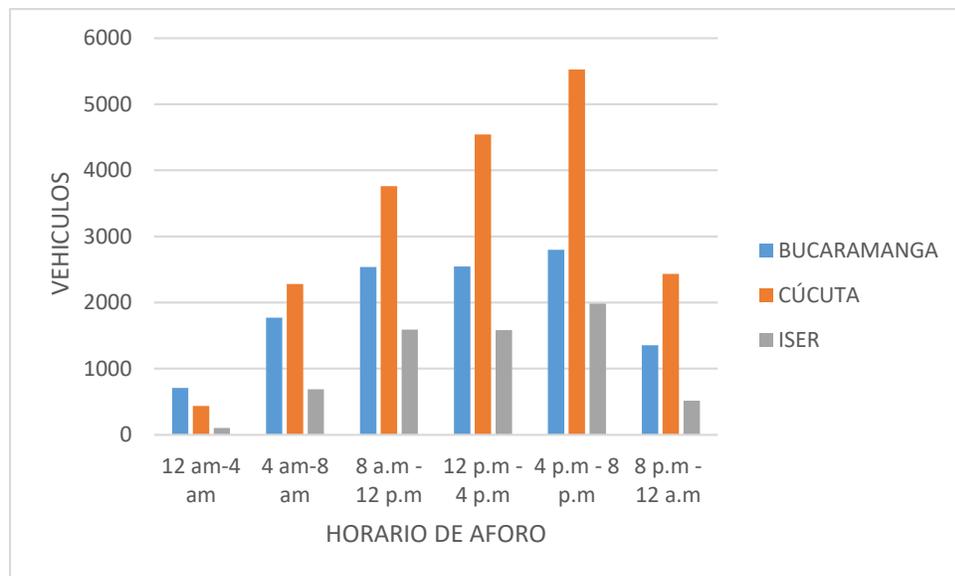
**Fuente:** La Rotta, 2018

Según lo mostrado en la Figura 15, se presentó mayor número de vehículos transitados durante el fin de semana en que se realizó el aforo vehicular y durante la semana se presentó una disminución continua en el flujo vehicular transitado, en

las tres estaciones de aforo. Durante el periodo de aforo se reflejó una tendencia, que inicia el jueves 28 de mayo y llega a su máximo valor el sábado 30 de mayo, a partir de este día empieza el descenso en el número de vehículos hasta el último día de aforo, tendencia que se mantiene en las tres estaciones de aforo. La tendencia del aumento del flujo vehicular durante el fin de semana puede ser un indicador para los análisis de tránsito y de prevención, en términos de contaminación atmosférica.

En la Figura 16 se muestra el volumen de vehículos registrados en las tres estaciones de aforo de acuerdo al horario de aforo vehicular.

**Figura 16** Volumen de vehículos transitados por horario de aforo



Fuente: La Rotta, 2018

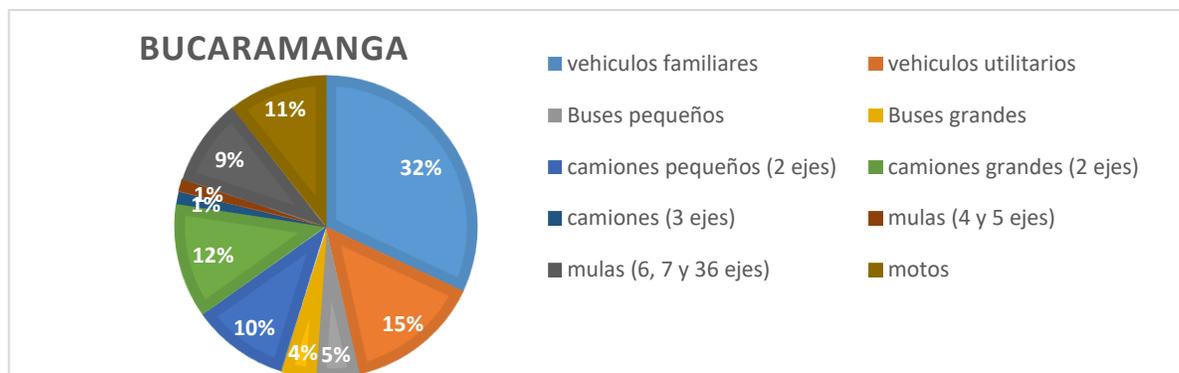
En la Figura 16 se observa que el mayor número de vehículos transitan en el horario de 4 pm a 8 pm, comportamiento que se registró en las tres estaciones de aforo. En este caso, la tendencia del flujo vehicular inicia en el horario de 12 am a 4 am y a medida que transcurre el día el aumento es continuo hasta las horas de la tarde, donde se presenta el máximo número de vehículos transitados. El comportamiento registrado del flujo vehicular durante las horas del día es un indicador para el análisis de los compuestos contaminantes emitidos por los vehículos durante el día y con esto, establecer controles de tránsito en el municipio.

En las Figuras 17, 18 y 19 se muestra la distribución porcentual de los distintos tipos de vehículos cuantificados en las tres estaciones de aforo, de acuerdo a las categorías establecidas por el INVIAS y según el número de ejes de cada uno.

Como se observa, para las tres estaciones de aforo, el mayor número de vehículos transitados es vehículos familiares, correspondientes a camionetas, que han aumentado sustancialmente en los últimos años en el municipio. En segundo lugar, se registraron los vehículos utilitarios que corresponden a vehículos particulares pequeños y taxis, que se observan diariamente en el casco urbano del municipio, seguido de motos, camiones pequeños y grandes de 2 ejes, vehículos que emiten gran cantidad de contaminantes por la combustión incompleta. Por otra parte, se registraron en menor proporción los buses pequeños y grandes con porcentajes muy cercanos, seguido de los camiones de 3 ejes y las mulas de 4 y 5 ejes las mulas de 6, 7 y 36 ejes, circularon en mayor proporción por las estaciones ubicadas sobre la vía a Bucaramanga y la vía a Cúcuta, caso contrario a su porcentaje de transito por la estación ISER que es muy poco significativo.

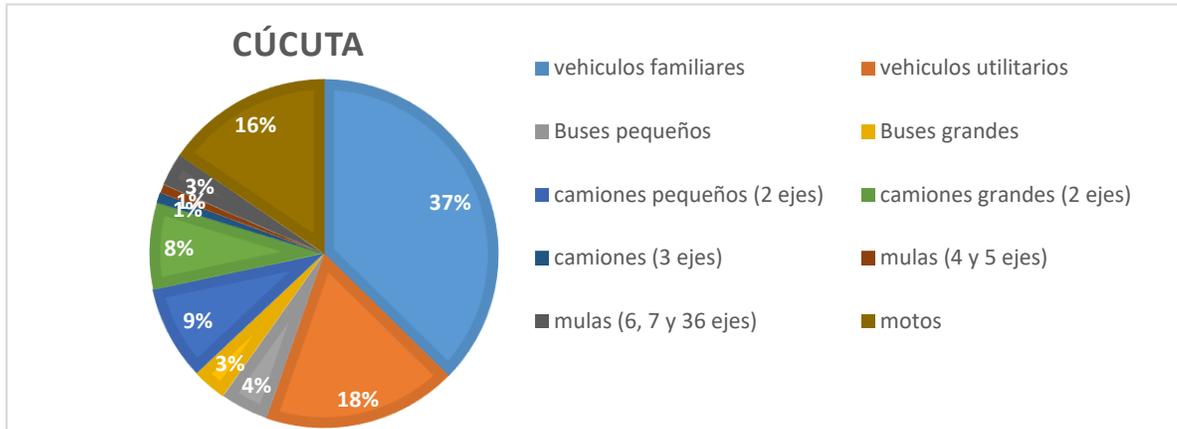
Es importante tener en cuenta el tránsito de los vehículos de acuerdo al número de ejes, pues de esta manera se establece el porcentaje de emisión de gases como el Monóxido y el Dióxido de Carbono. El caso de los buses pequeños y grandes es preocupante, pues aún se encuentran en circulación modelos de vehículos antiguos, muchos de ellos intermunicipales sin mayores controles de gases y que emiten gran cantidad de contaminantes. Así mismo, los camiones, mulas y todo tipo de vehículos de carga pesada también se encuentran en circulación, muchos de ellos sin mayores controles y que emiten gases contaminantes, contribuyendo sustancialmente al aumento de las emisiones en el municipio y, por ende, a la acumulación de gases y el aumento de afecciones respiratorias y deterioro de las estructuras localizadas a los costados de las vías principales. Es importante recalcar que cada tipo de vehículo emite una cantidad específica de gases de acuerdo a las condiciones de la máquina, motor, combustible y condiciones de rodamiento, variables de gran relevancia en los análisis de contaminación atmosférica.

**Figura 17** Distribución porcentual de los vehículos transitados por la estación de aforo vía a Bucaramanga



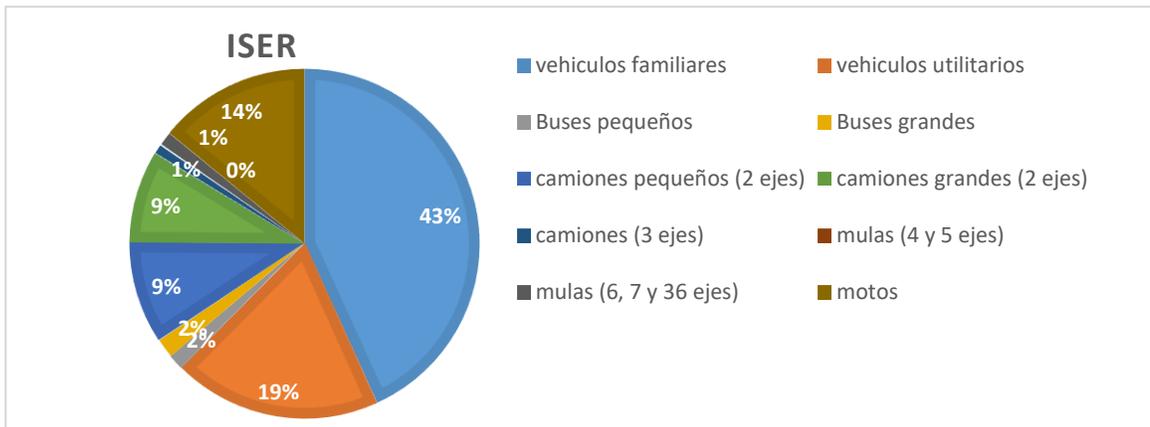
Fuente: La Rotta, 2018

**Figura 18** Distribución porcentual de los vehículos transitados por la estación de aforo vía a Cúcuta



Fuente: La Rotta, 2018

**Figura 19** Distribución porcentual de los vehículos transitados por la estación de aforo ISER



Fuente: La Rotta, 2018

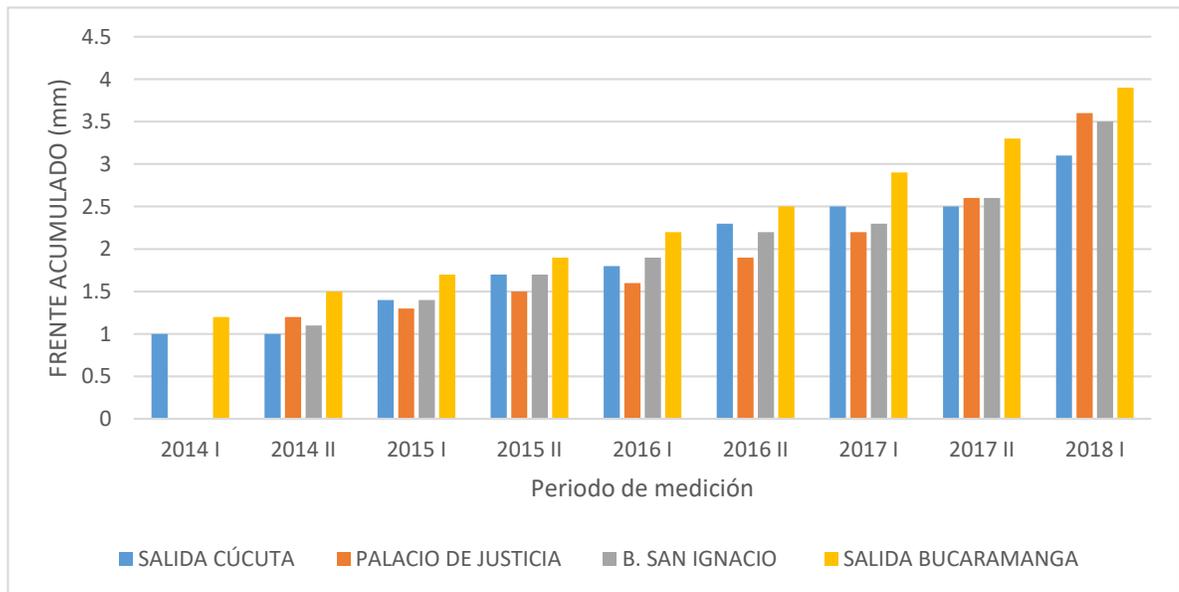
## 7.2 Análisis de edificaciones amenazadas

En este apartado se presentan los principales resultados obtenidos del análisis de las edificaciones amenazadas realizado en tres puntos estratégicos del municipio de Pamplona, a lo largo de la vía nacional donde se presenta una alta circulación de vehículos de distinto tipo.

En la Figura 20 se presentan los valores registrados de las profundidades registradas de los frentes de carbonatación en las edificaciones expuestas a la

carbonatación por la influencia del Dióxido de Carbono CO<sub>2</sub> en los tres puntos de medición establecidos para el periodo de medición. Cabe mencionar que los datos presentados corresponden al valor acumulado del frente de carbonatación durante los últimos cinco años, en periodos de seis meses.

**Figura 20** Frente de carbonatación acumulado para el periodo de medición

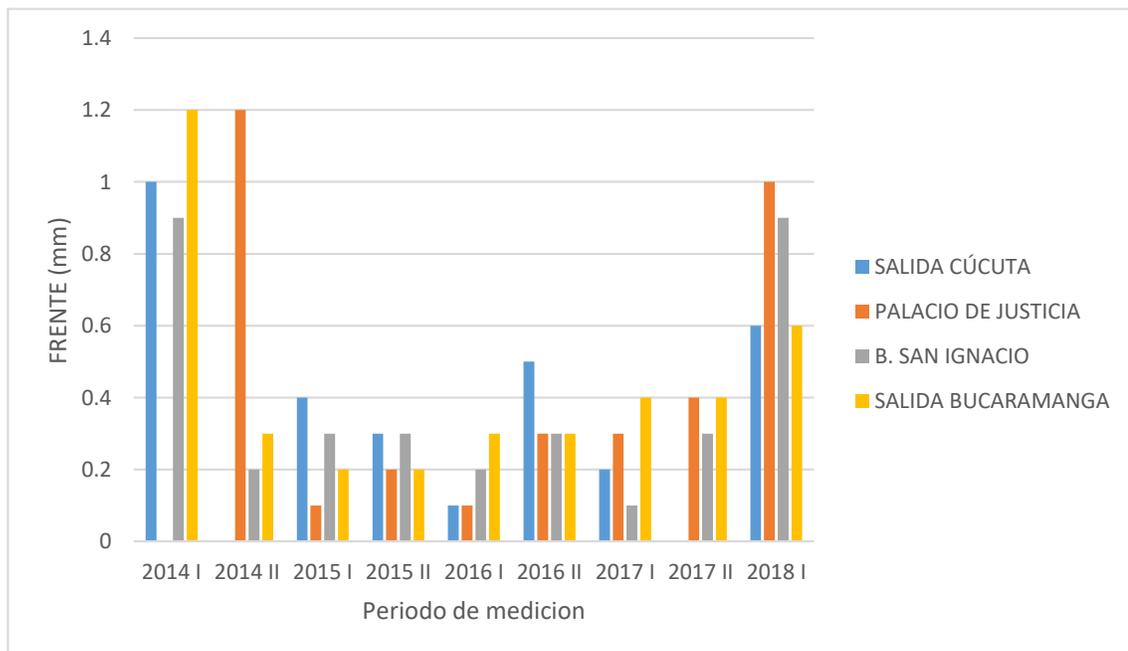


**Fuente:** La Rotta, 2018

Según los resultados obtenidos, se presenta una variación en la profundidad de penetración para los cuatro puntos de medición; en general, el avance de carbonatación más significativo se presentó en el punto ubicado sobre la vía a Bucaramanga en cercanías a la entrada de la Universidad de Pamplona, seguido del punto localizado en el barrio San Ignacio y el Palacio de Justicia. En el caso de la edificación expuesta localizada en la salida a Cúcuta se presentaron los menores valores del frente de carbonatación, indicando que hay mayor influencia del Dióxido de carbono emitido por el flujo vehicular transitado por la vía a Bucaramanga que por la vía a Cúcuta.

Así mismo, en la Figura 21 se presenta la variación general de los frentes de carbonatación en cada punto de medición.

**Figura 21** Frente de carbonatación general para el periodo de medición



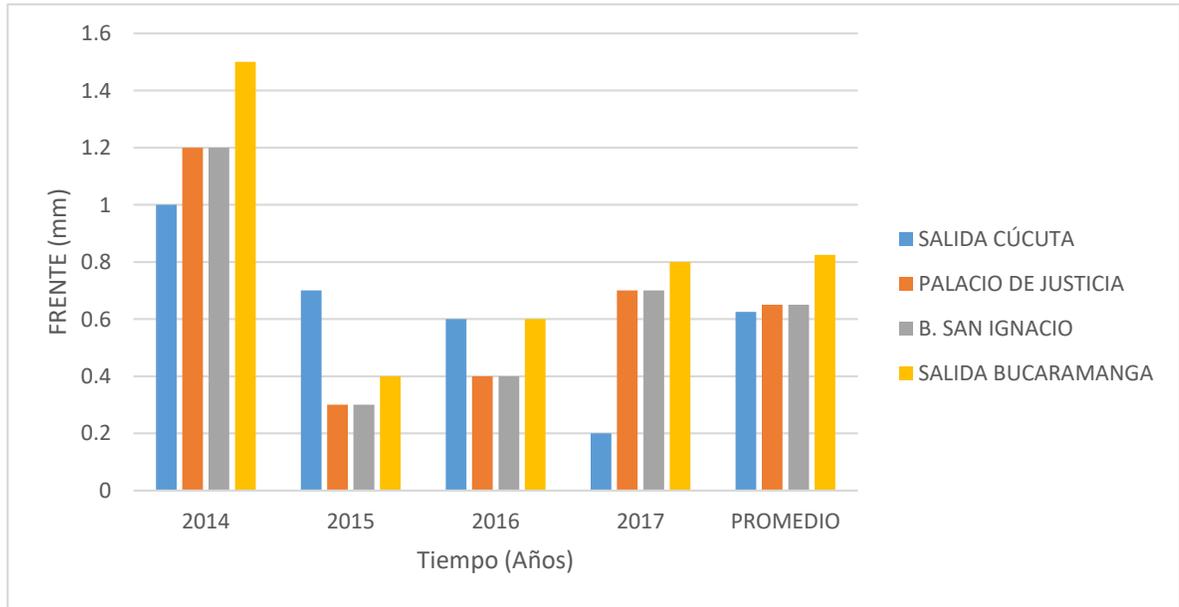
**Fuente:** La Rotta, 2018

Como se observa, se presenta un avance más notorio en el frente de carbonatación registrado para el periodo 2014 I-2014 II y para el ultimo frente de carbonatación registrado, en el periodo 2018 I; en los demás periodos de medición se presentaron valores poco avanzados del frente de carbonatación y, en general, en el punto de medición donde se presentó mayor avance fue en el punto ubicado sobre la vía a Bucaramanga, comportamiento que coincide con el gran número de vehículos transitados por este importante corredor vial. Las otras estaciones con un importante avance en el frente de carbonatación son las ubicadas sobre la vía a Cúcuta y la ubicada en cercanías al Palacio de Justicia. Por otro lado, la estación ubicada en cercanías al barrio San Ignacio presento los menores valores de avance en el frente de carbonatación, indicando una reacción lenta por parte del CO<sub>2</sub> y los componentes del concreto en las edificaciones analizadas en este punto.

Además, el avance de carbonatación en cada punto de medición para cada periodo analizado no supera los valores máximos permitidos por la Norma Sismo Resistente (2010), que establece diferentes rangos para elementos expuestos dependiendo del grado de agresividad del medio. En este caso, el grado de agresividad del medio es moderado, teniendo en cuenta las emisiones de dióxido de Carbono producto de la quema de combustibles fósiles en los vehículos transitados por los principales corredores viales del municipio de Pamplona.

En la Figura 22 se muestra el avance del frente de carbonatación anual para los puntos de medición establecidos en el municipio de Pamplona.

**Figura 22** Avance anual del frente de carbonatación



**Fuente:** La Rotta, 2018

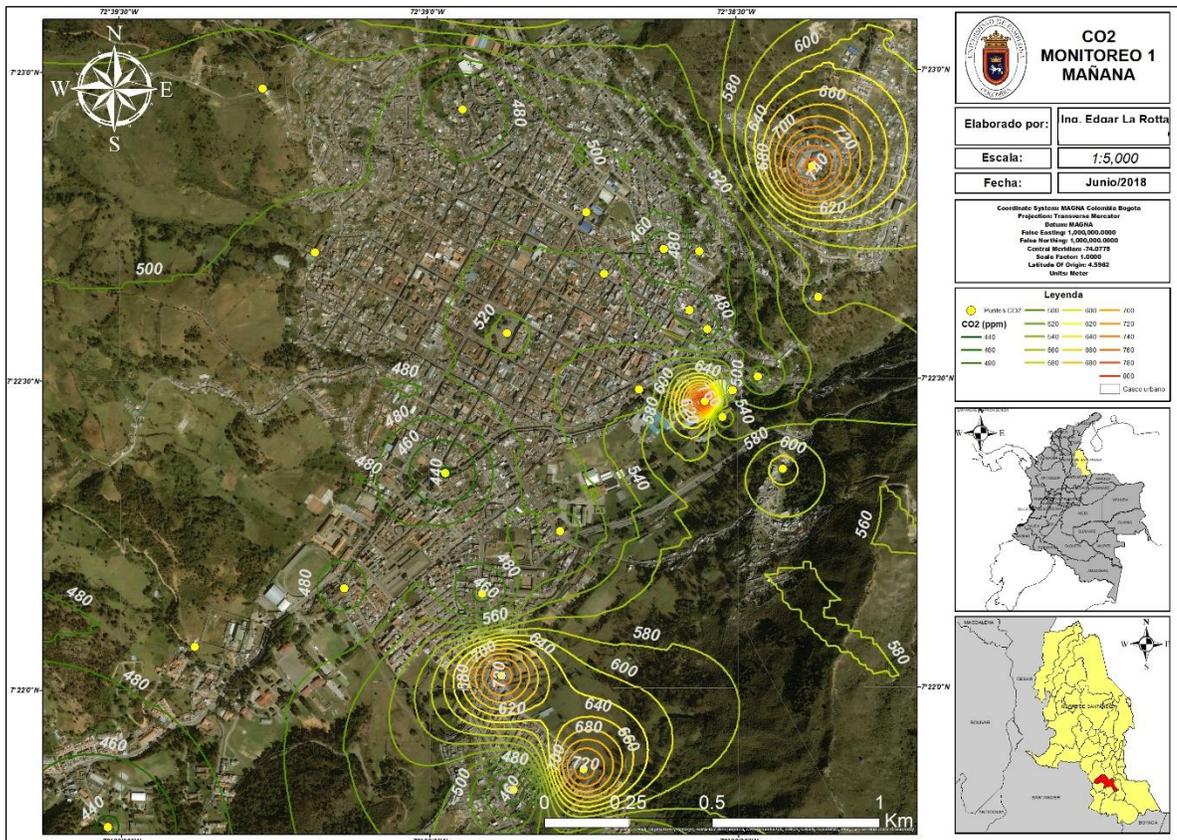
De acuerdo a los resultados obtenidos, los frentes de carbonatación registrados en todos los puntos de medición reflejan un estado de carbonatación avanzado; sin embargo, la Norma Sismo Resistente (2010) permite ciertas tolerancias cuando el proceso se ha detectado a tiempo. En este caso, los frentes de carbonatación analizados no superan los valores máximos permitidos por la NSR-10, pues ninguno sobrepasa el recubrimiento de la estructura, indicando que el estado de avance de la carbonatación aun no alcanza el acero de refuerzo (proceso de corrosión o despasivación). Así mismo, se observa que estado más avanzado del frente de carbonatación se presenta en el punto localizado en la salida a Bucaramanga, seguido del punto localizado sobre la salida a Cúcuta y en general, para todos los casos, se presentó un avance más rápido durante el año 2014 en comparación con los últimos años de registro; los años en que se presentó un menor avance en el frente de carbonatación fueron el 2015 y 2016 en todos los puntos de medición. Respecto a los valores promedio se observa que en la mayoría de los puntos de medición se supera el frente de carbonatación.

### 7.3 Determinación del Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de la cuantificación del Dióxido de Carbono de acuerdo a la variación altitudinal en el casco urbano del municipio de Pamplona. Los resultados se presentan en mapas cartográficos empleando ArcGIS para el análisis del comportamiento espacial del Dióxido de Carbono en el municipio de Pamplona. Además, se presenta el comportamiento espacial de la temperatura ambiente y su influencia en la reacción del CO<sub>2</sub> con otros compuestos y el ataque a las estructuras de concreto reforzado que se ubican en los costados de las vías principales del municipio.

En la Figura 23 se presenta el comportamiento espacial de Dióxido de Carbono correspondiente al primer monitoreo en las horas de la mañana.

**Figura 23** Comportamiento espacial CO<sub>2</sub> monitoreo 1-Mañana



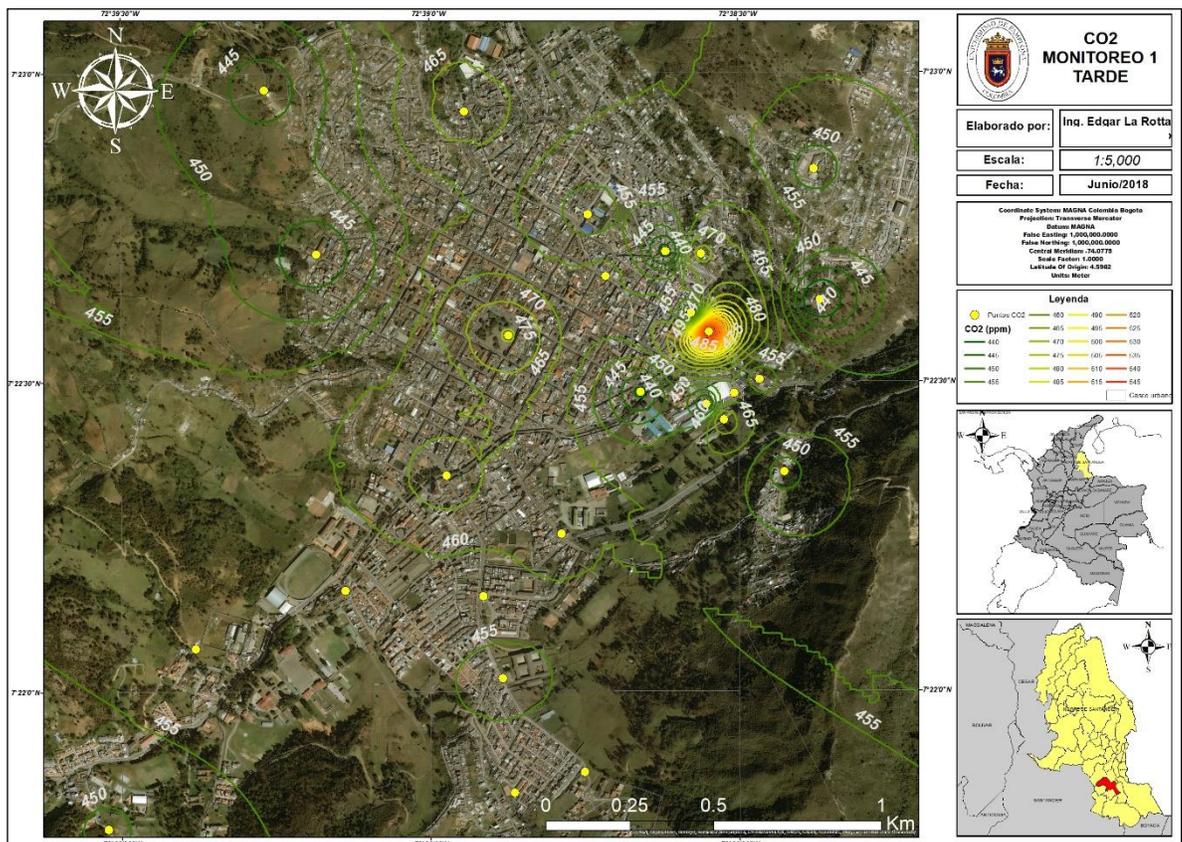
Fuente: La Rotta, 2018

Se observa un aumento en las concentraciones de CO<sub>2</sub> en las horas de la mañana sobre los puntos localizados en cercanías al Terminal de Transportes Pamplona y

en cercanías al barrio Simón Bolívar y en inmediaciones del barrio San Pedro, comportamiento que se puede deber a la confluencia de vehículos en el Terminal de transportes, el alto tránsito de vehículos por la vía a Cúcuta y la dispersión de los contaminantes hacia las zonas más altas del municipio. Por otro lado, las concentraciones disminuyen en la zona céntrica del municipio y hacia la zona sur (barrio Santa Martha), barrios donde hay poca confluencia de flujo vehicular. Cabe mencionar que en el municipio no se encuentran industrias que puedan contribuir a las emisiones de CO<sub>2</sub>, por tanto, en el municipio la mayor parte de emisiones se atribuyen al alto flujo vehicular que circula diariamente. El comportamiento presentado en las horas de la mañana da cuenta que el CO<sub>2</sub> se concentra más en la zona Norte del municipio.

En la Figura 24 se presenta el comportamiento espacial de Dióxido de Carbono correspondiente al primer monitoreo en las horas de la tarde.

**Figura 24** Comportamiento espacial CO<sub>2</sub> monitoreo 1-Tarde

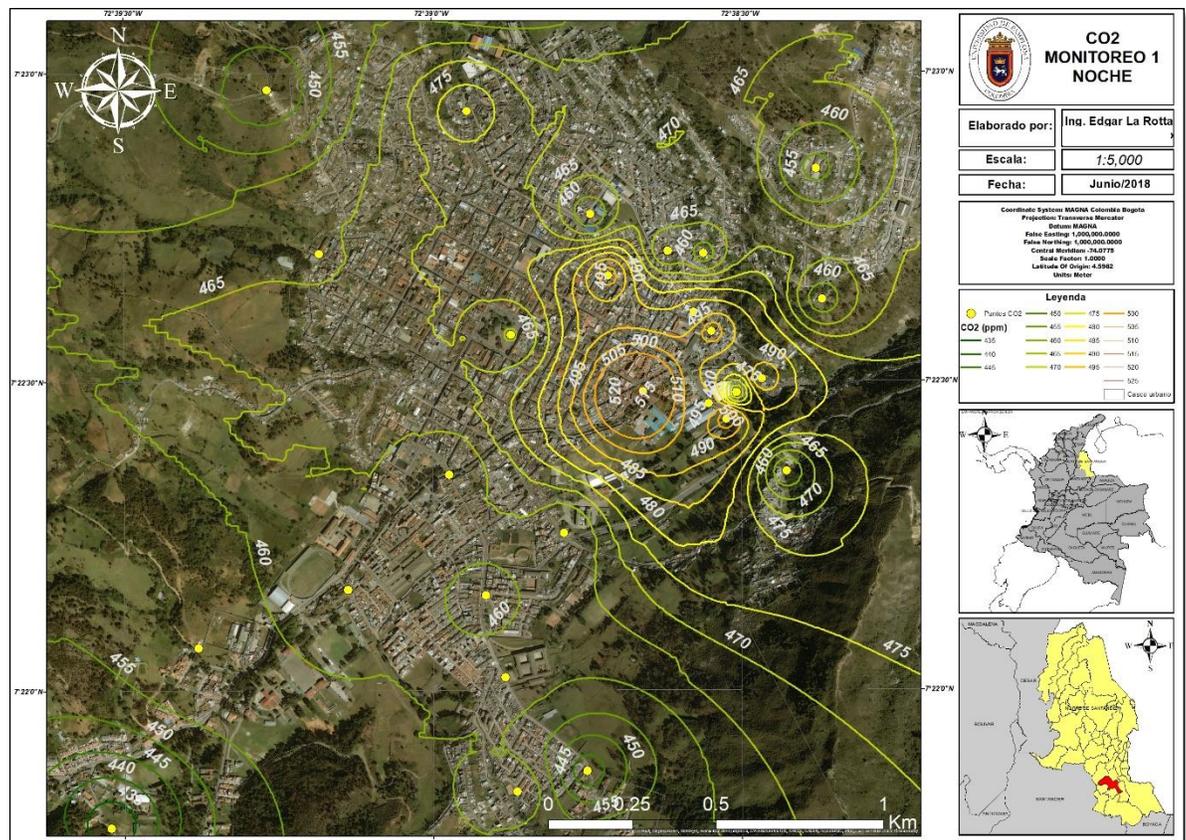


Fuente: La Rotta, 2018

Como se observa, las mayores concentraciones de Dióxido de Carbono se presentan en cercanías al Terminal de Transportes, sobre la vía principal que va hacia la ciudad de Cúcuta, zona donde confluyen gran cantidad de vehículos, sobre todo buses intermunicipales y vehículos de carga pesada como mulas y camiones. En los demás puntos de monitoreo que abarcan el casco urbano del municipio las concentraciones se mantienen constantes y no superan los 480 ppm. En comparación con las concentraciones registradas en el monitoreo de la mañana, las concentraciones disminuyeron notoriamente en todo el casco urbano, pues se encuentran en el rango de 440 y 500 ppm, mientras que las registradas en la mañana superan los 700 ppm. Además, en la tarde, las concentraciones disminuyeron gradualmente en la zona periférica y céntrica del municipio, concentrándose los valores solo en la parte norte.

En la Figura 25 se presenta el comportamiento espacial de Dióxido de Carbono correspondiente al primer monitoreo en las horas de la noche.

**Figura 25** Comportamiento espacial CO<sub>2</sub> monitoreo 1-Noche

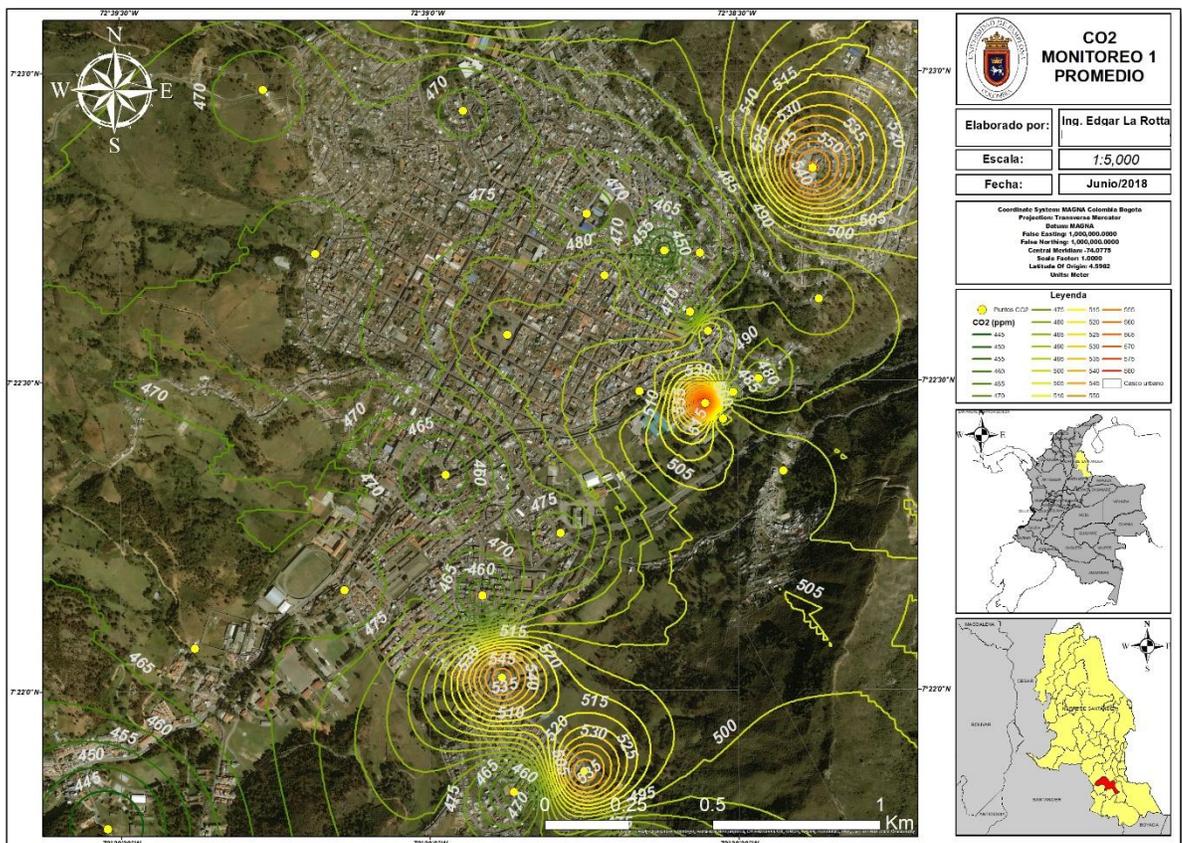


Fuente: La Rotta, 2018

En las horas de la noche, se observa una disminución notoria de las concentraciones de Dióxido de Carbono en todo el municipio, incluyendo la zona Norte donde durante las horas del día aumentaron considerablemente las concentraciones. Aunque no se presenta un punto donde confluyen los valores de CO<sub>2</sub>, se registraron algunas concentraciones de 510 y 515 ppm, en cercanías al hospital del municipio. En general, en las horas de la noche las concentraciones tienden a dispersarse y a disminuir por el poco flujo vehicular que transita por los corredores viales del municipio. En este caso, se mantiene la tendencia de los valores más altos de Dióxido de Carbono en la zona norte del municipio y los más bajos en la zona céntrica y periférica.

En la Figura 26 se presenta el comportamiento espacial de Dióxido de Carbono correspondiente al primer monitoreo en promedio.

**Figura 26** Comportamiento espacial CO<sub>2</sub> monitoreo 1-Promedio



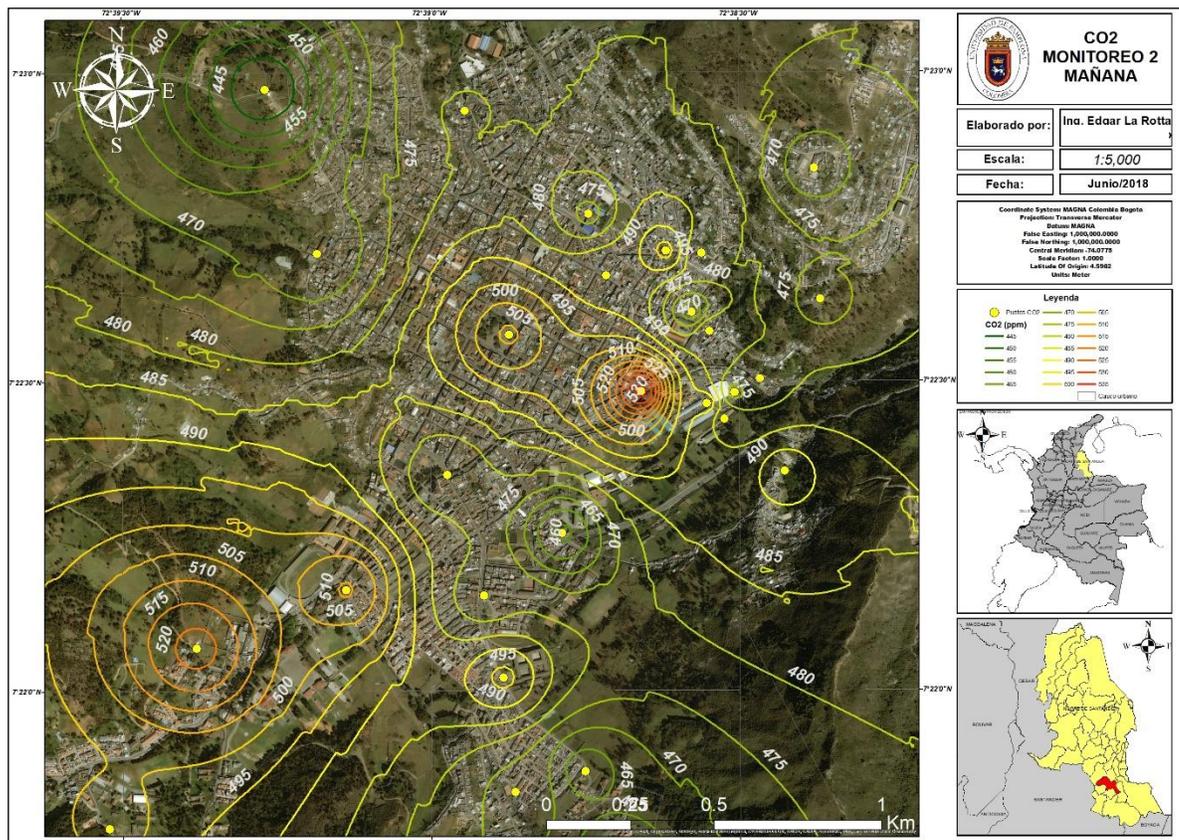
Fuente: La Rotta, 2018

Los valores representados espacialmente en la Figura 26 dan cuenta del comportamiento del Dióxido de Carbono durante el primer monitoreo realizado en

el mes de abril, según esto, las concentraciones de CO<sub>2</sub> concluyen en la zona Norte, Noreste y Noroeste del municipio, con gran influencia de los valores registrados en las horas de la mañana, mientras que en la zona céntrica y la zona Sur las concentraciones disminuyen considerablemente, comportamiento registrado y analizado en cada horario de monitoreo. Lo anterior indica que el flujo vehicular circulado por la vía que conduce a Cúcuta (mayor flujo vehicular registrado en los aforos realizados) tiene gran influencia en las concentraciones registradas en los puntos ubicados sobre esta vía. Además, en el análisis de las edificaciones expuestas a la patología de carbonatación se evidencio un frente de carbonatación avanzado en el punto localizado sobre esta vía desde el 2014 hasta 2017, lo que evidencia la incidencia que ha tenido el Dióxido de Carbono sobre los procesos de patología estructural en esta zona a lo largo de los últimos 5 años.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del monitoreo de Dióxido de Carbono realizado en el mes de mayo de 2018. En la Figura 27 se presenta el comportamiento espacial de Dióxido de Carbono correspondiente al segundo monitoreo en las horas de la mañana.

**Figura 27** Comportamiento espacial CO<sub>2</sub> monitoreo 2-Mañana

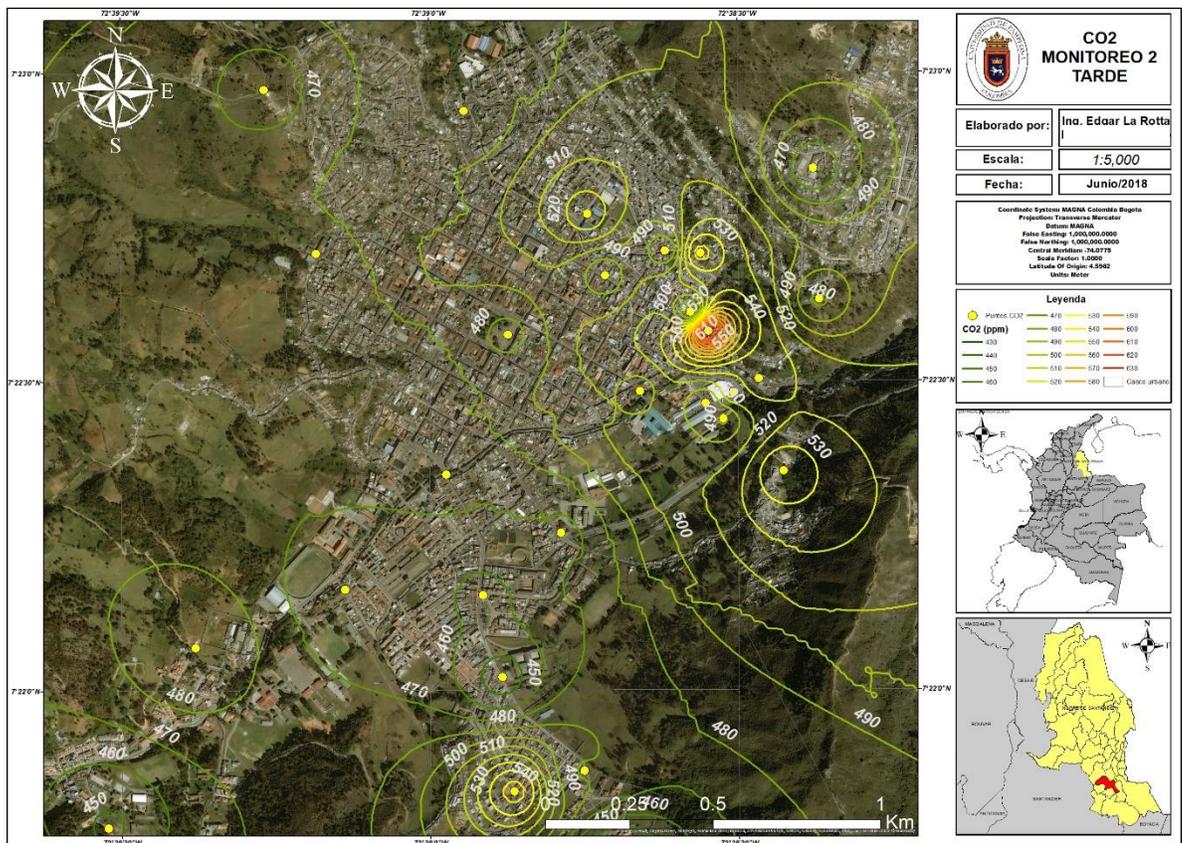


Fuente: La Rotta, 2018

Como se observa en la Figura 27, las máximas concentraciones de CO<sub>2</sub> registradas en el segundo monitoreo se presentan en la zona Norte, en cercanías al Terminal de Transportes; sin embargo, en comparación con el primer monitoreo realizado en las horas de la mañana, no se observa la confluencia de las concentraciones de CO<sub>2</sub> hacia la zona Noreste y Noroeste. En este caso, se presentaron concentraciones de 520 y 530 ppm en la zona céntrica (Parque central) y valores cercanos a los 450 ppm en la zona periférica y la zona sur del municipio. Las concentraciones registradas en las horas de la mañana durante este monitoreo no superan los 535 ppm, caso contrario a las registradas en el primer monitoreo, que las máximas concentraciones superaban los 720 ppm; este comportamiento está influenciado por el flujo vehicular que transita mensualmente y la incidencia de la velocidad y dirección del viento que tiende a depositar y acumular los contaminantes hacia zonas específicas.

En la Figura 28 se presenta el comportamiento espacial de Dióxido de Carbono correspondiente al segundo monitoreo en las horas de la tarde.

**Figura 28** Comportamiento espacial CO<sub>2</sub> monitoreo 2-Tarde

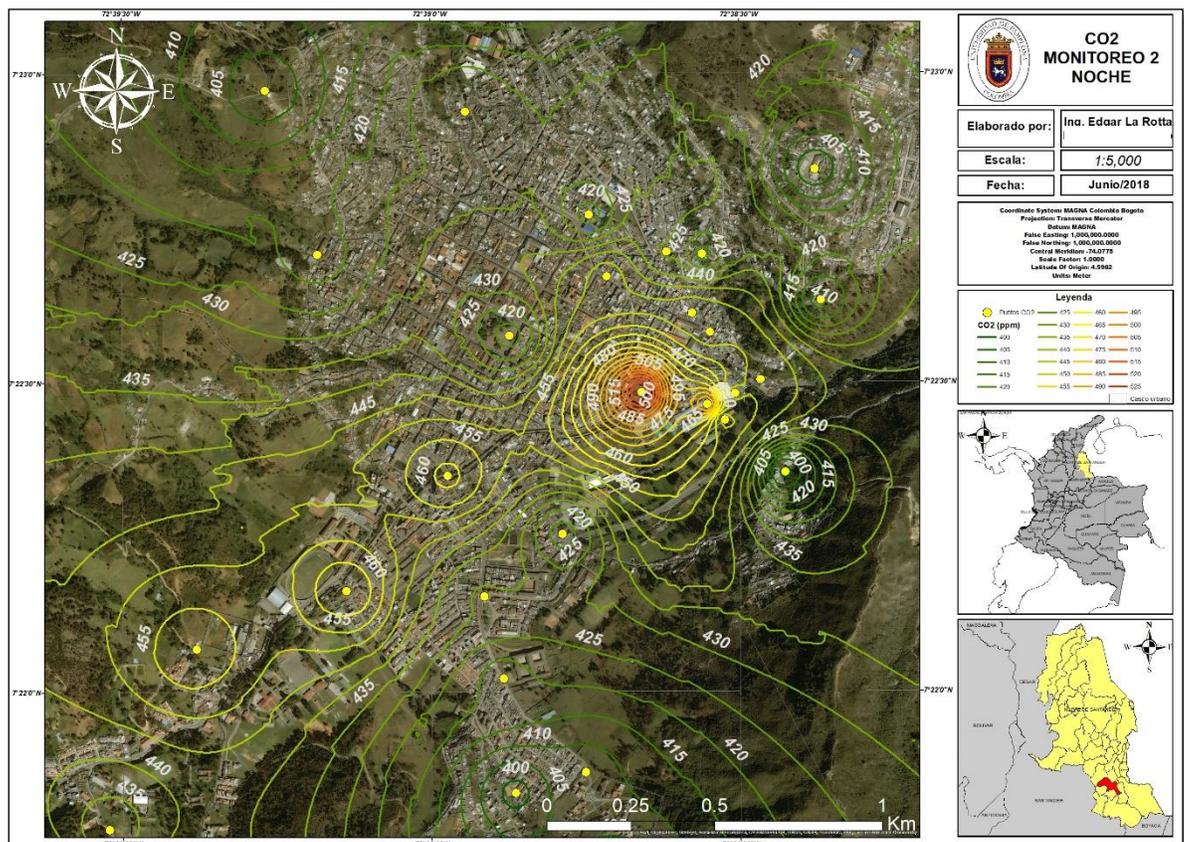


Fuente: La Rotta, 2018

En este caso, las mayores concentraciones de Dióxido de Carbono cercanas a los 620 ppm, confluyen en la zona Norte del municipio, sobre la vía a Cúcuta en cercanías al colegio San Francisco, zona muy transitada por distintos tipos de vehículos, entre los que se destacan buses grandes y vehículos de carga pesada. Por otra parte, en los demás puntos de monitoreo de CO<sub>2</sub> se registraron concentraciones que no superan los 520 ppm. Así mismo, se observó un leve aumento en las concentraciones registradas sobre la zona Noreste en el barrio San Pedro. En comparación con las concentraciones registradas durante el primer monitoreo en las horas de la tarde, aumentaron en cierta proporción, llegando al rango de los 630 ppm.

En la Figura 29 se presenta el comportamiento espacial de Dióxido de Carbono correspondiente al segundo monitoreo en las horas de la noche.

**Figura 29** Comportamiento espacial CO<sub>2</sub> monitoreo 2-Noche



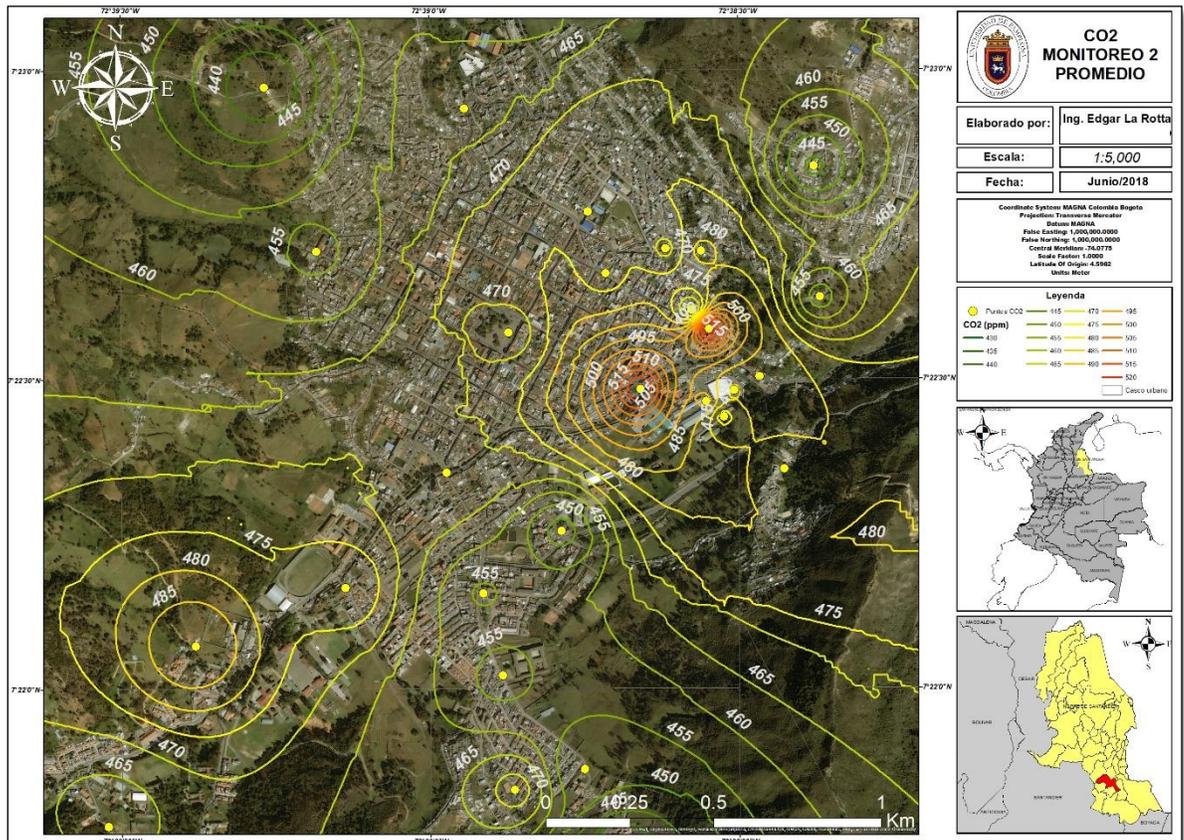
Fuente: La Rotta, 2018

Durante el segundo monitoreo de CO<sub>2</sub> realizado en las horas de la noche se registraron concentraciones entre los 400 y los 520 ppm en el casco urbano del

municipio de Pamplona, destacándose las concentraciones presentadas en la zona Norte, sobre la vía principal en cercanías al Hospital municipal, comportamiento similar al registrado en el primer monitoreo, solo que en este caso, las concentraciones confluyen mayormente en esta zona en comparación con el primer monitoreo, En las demás zonas del municipio se presentaron concentraciones sobre el rango entre los 400 y 450 ppm.

En la Figura 30 se presenta el comportamiento espacial de Dióxido de Carbono correspondiente al segundo monitoreo en promedio.

**Figura 30** Comportamiento espacial CO<sub>2</sub> monitoreo 2-Promedio



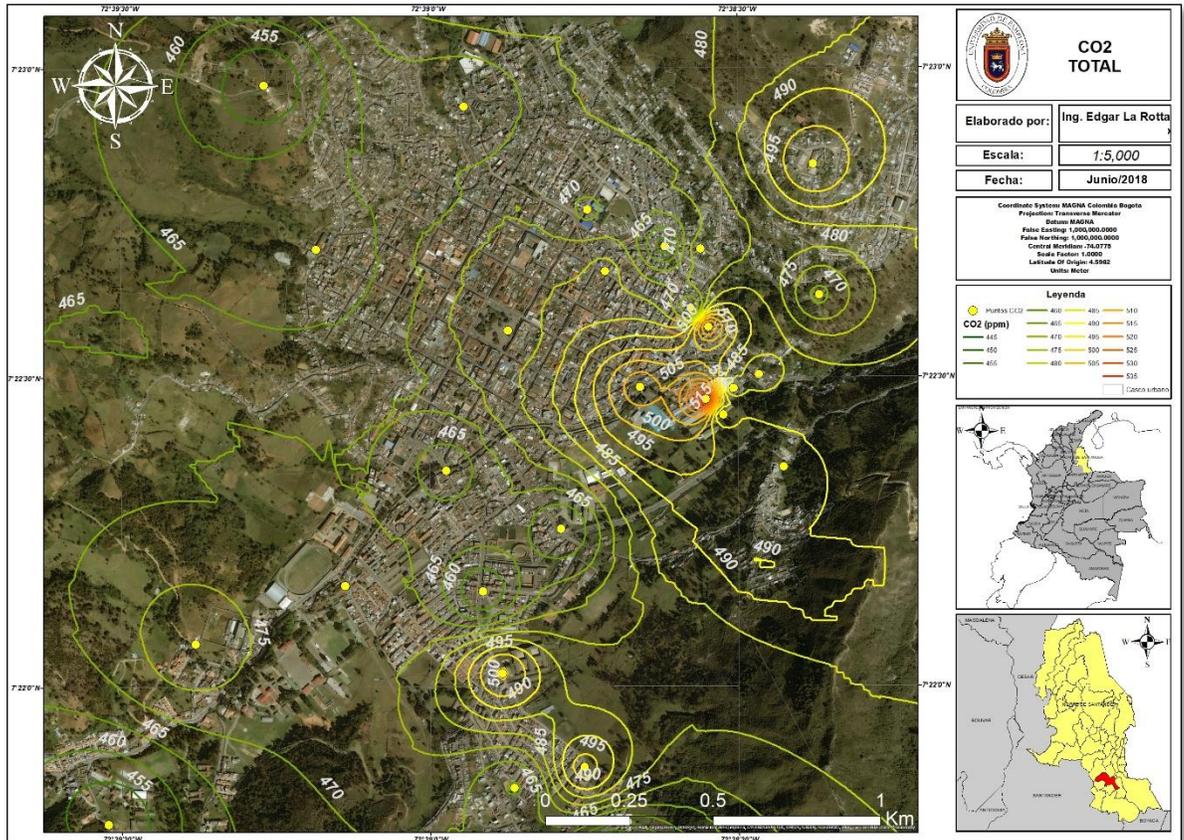
Fuente: La Rotta, 2018

En general, durante el segundo monitoreo de CO<sub>2</sub>, realizado en el mes de mayo se presentaron dos zonas estratégicas en el municipio, donde confluyen las mayores concentraciones de Dióxido de Carbono, con valores entre los 500 y los 515 ppm, debido principalmente a la influencia del flujo vehicular que transita por las vías principales del municipio. Al igual que en los anteriores registros, sobre la zona céntrica y periférica del municipio se presentaron los valores mínimos de

concentraciones de CO<sub>2</sub>. En el primer monitoreo se presentó un aumento en las concentraciones registradas en la zona Noreste (barrio San Pedro), caso contrario al comportamiento presentado en el segundo monitoreo, en el que se presentaron valores muy bajos de CO<sub>2</sub>, teniendo en cuenta la influencia del viento que genera una dispersión del contaminante hacia otras zonas.

En la Figura 31 se presenta el comportamiento espacial de Dióxido de Carbono total en el municipio de Pamplona, correspondiente a las concentraciones promedio de los monitoreos realizados durante los meses de abril y mayo.

**Figura 31** Comportamiento espacial del CO<sub>2</sub> Total



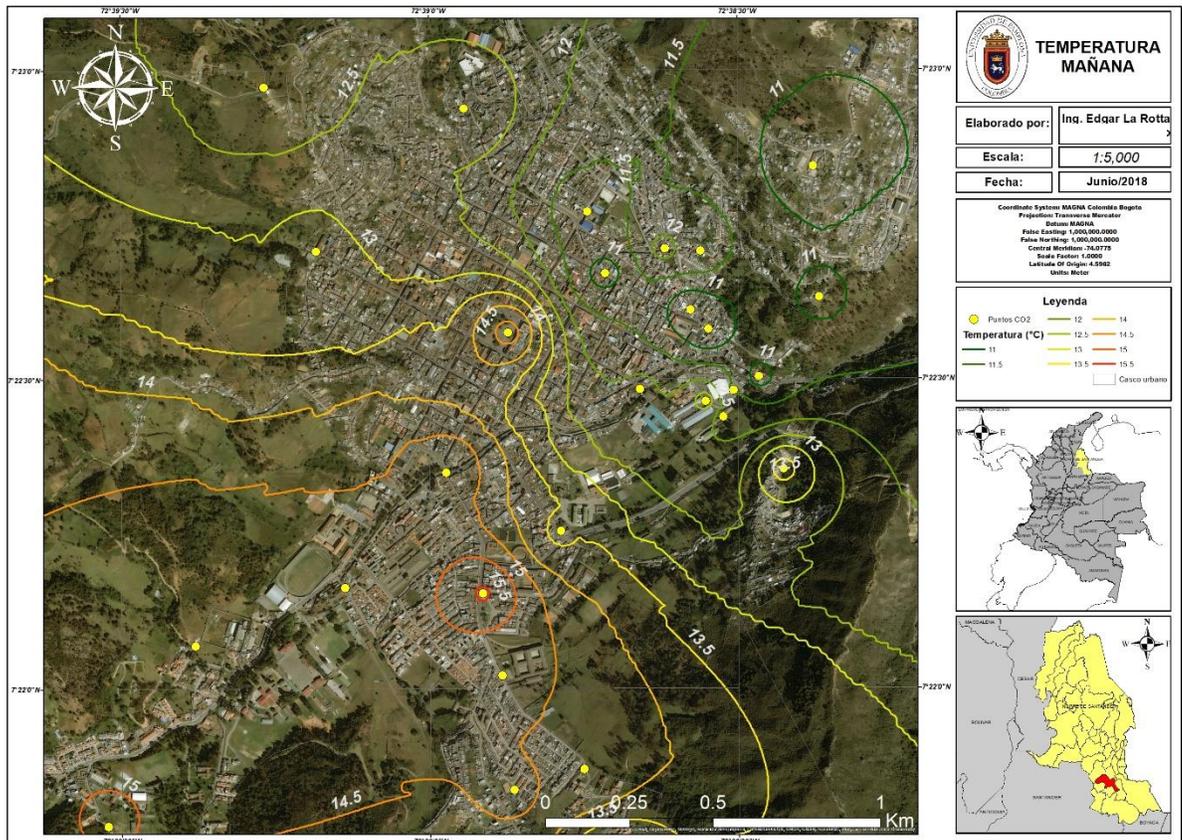
**Fuente:** La Rotta, 2018

Los monitoreos realizados reflejan que el Dióxido de Carbono total registrado se encuentra en el rango de los 445 a los 530 ppm; los valores máximos se presentaron en la zona Norte en los puntos de monitoreo establecidos sobre las cotas 2280 y 2290 Norte, en cercanías al Terminal de Transportes del municipio y sobre la vía principal en cercanías al colegio San Francisco, lugares donde concurren gran cantidad de vehículos de carga pesada y buses intermunicipales. Las menores

concentraciones de CO<sub>2</sub> se registraron en el centro histórico del municipio, que comprende el Parque principal y las calles alrededor y en la zona periférica que abarca barrios como Santa Martha, Los Tanques y la Universidad de Pamplona. En otras zonas se presentaron valores relativamente altos como en el barrio San Pedro y Simón Bolívar, teniendo en cuenta la dispersión del gas contaminante hacia la zona Norte y las horas de mayor confluencia de vehículos que, según lo analizado, se presenta entre las 4 y las 8 de la noche.

A continuación, se presenta el análisis del comportamiento espacial de la temperatura ambiente registrada durante el periodo de muestreo del Dióxido de Carbono. En la Figura 32 se presenta el comportamiento espacial de la temperatura promedio registrada en las horas de la mañana para los dos monitoreos realizados.

**Figura 32** Comportamiento espacial de la Temperatura-Mañana



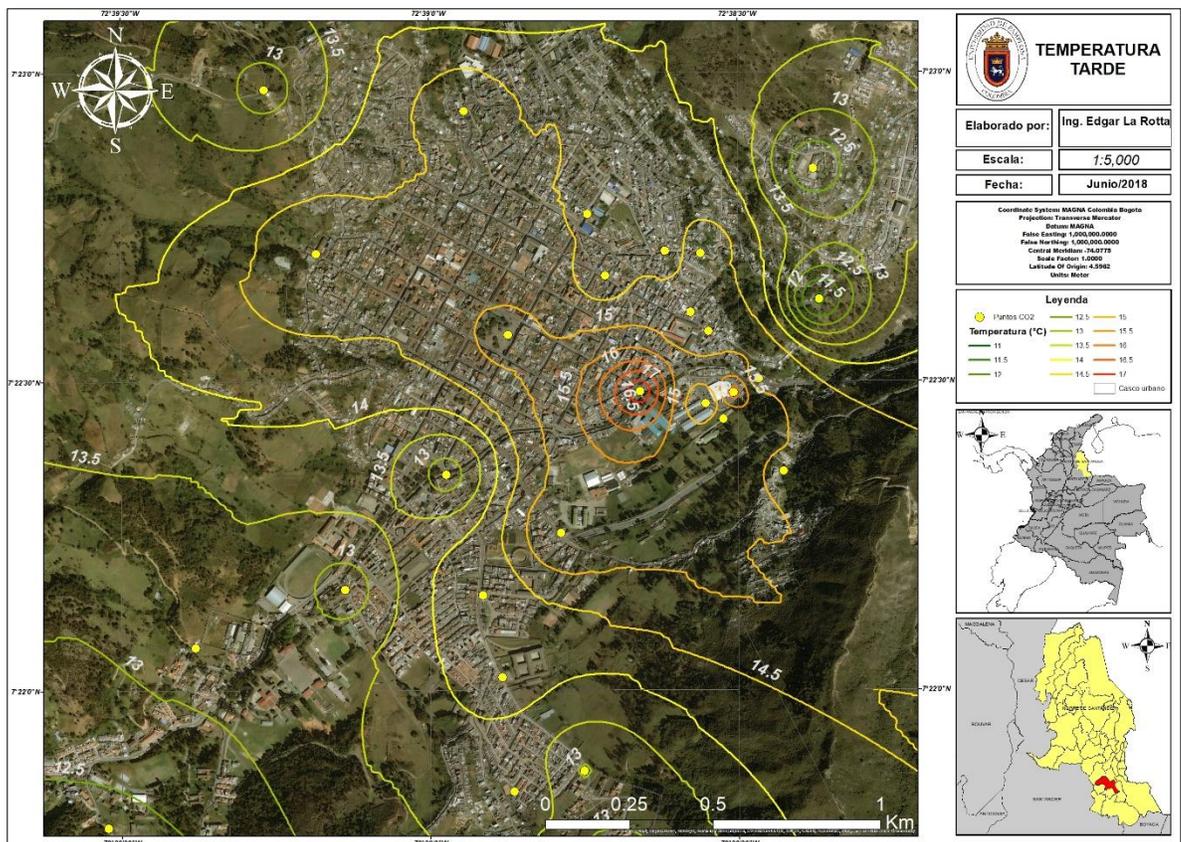
Fuente: La Rotta, 2018

En general, durante las horas de la mañana no se presenta mayor variación en la Temperatura ambiente registrada, el rango se encuentra entre los 12 y los 15,5 °C.

Los valores más altos de temperatura se presentaron en la zona Este, en cercanías al barrio San Pedro y los valores más bajos se registraron en la zona periférica, en el barrio Simón Bolívar y Santa Martha que da cuenta la relación indirecta entre la altitud y la temperatura. En la zona Norte, donde se presentaron las mayores concentraciones de Dióxido de Carbono, se presentaron valores bajos de temperatura (11°C).

En la Figura 33 se presenta el comportamiento espacial de la temperatura promedio registrada en las horas de la tarde para los dos monitoreos realizados.

**Figura 33** Comportamiento espacial de la Temperatura-Tarde



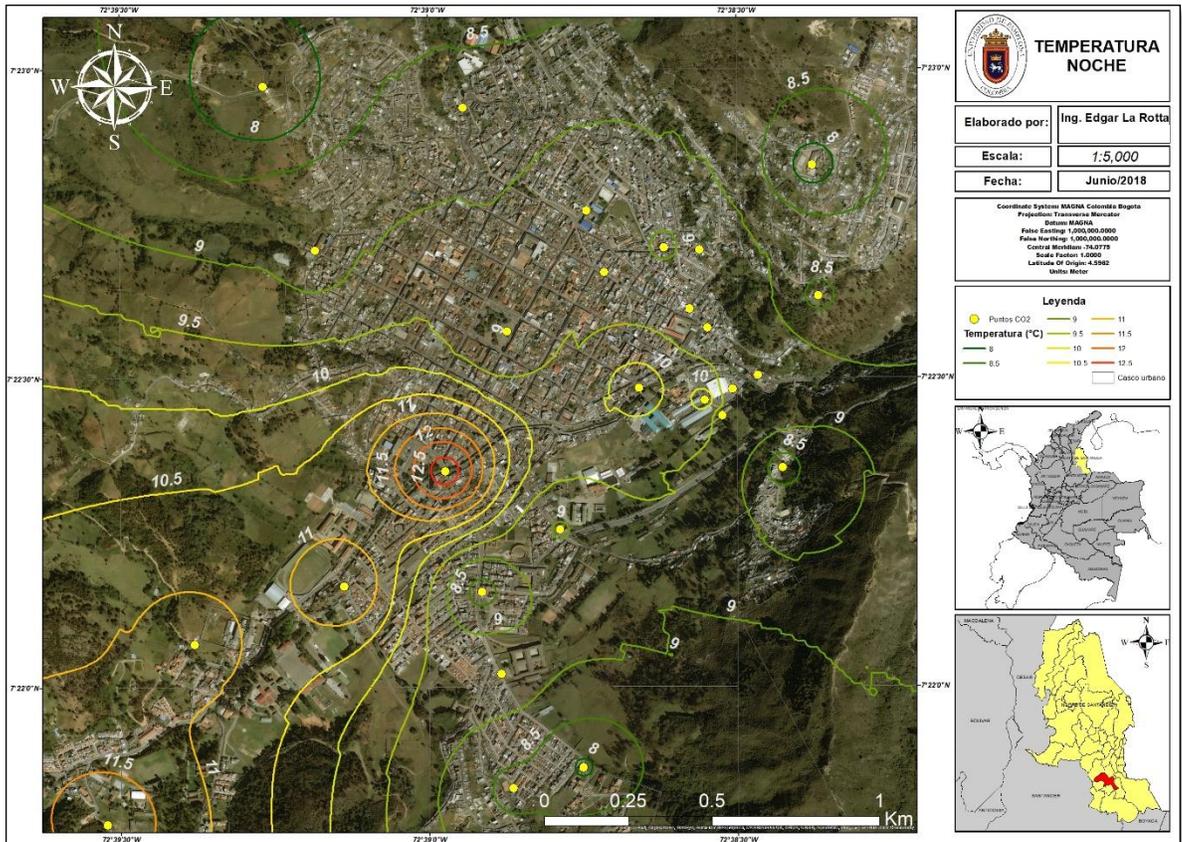
Fuente: La Rotta, 2018

Como se observa, en las horas de la tarde las temperaturas se encuentran entre los 12,5 y 17°C. En este caso, los valores más altos de temperatura se registraron en la zona Norte en cercanías al Hospital del municipio. Además, se mantiene la tendencia de los valores bajos hacia las zonas altas del municipio; hacia la zona céntrica se presentaron valores medios, cercanos a los 15,5 °C.

En la Figura 34 se presenta el comportamiento espacial de la temperatura promedio registrada en las horas de la noche para los dos monitoreos realizados.

Para el caso de los valores de temperatura registrados en las horas de la noche, los rangos se encuentran entre los 8 y los 12,5 °C, coincidiendo con la temperatura media del municipio durante la noche. De igual forma, los valores más bajos se presentaron en la zona periférica del municipio y el valor más alto (12,5 °C) se registró en la zona cercana a la Plazuela Almeyda.

**Figura 34** Comportamiento espacial de la Temperatura-Noche



**Fuente:** La Rotta, 2018

A continuación, se presenta la estadística descriptiva aplicada a los valores correspondientes a las concentraciones de Dióxido de Carbono y Temperatura ambiente registradas en los dos monitoreos realizados.

En la Tabla 2 se muestran los estadísticos descriptivos analizados para las concentraciones de Dióxido de Carbono y Temperatura.

**Tabla 2** Estadística descriptiva de CO<sub>2</sub> y Temperatura

Parámetro	MONITOREO 1		MONITOREO 2	
	CO <sub>2</sub> (ppm)	Temperatura (°C)	CO <sub>2</sub> (ppm)	Temperatura (°C)
<b>N</b>	288	288	288	288
<b>Valor mínimo</b>	426,00	8,30	386,10	6,77
<b>Valor máximo</b>	861,00	21,80	643,00	14,90
<b>Valor medio</b>	481,62	13,82	462,27	10,18
<b>Mediana</b>	463,00	14,20	469,50	9,92
<b>Desviación Estándar</b>	69,98	3,64	41,61	1,83
<b>Varianza</b>	4897,02	13,28	1731,20	3,34
<b>Coef. Variación</b>	0,15	0,26	0,09	0,18
<b>Curtosis</b>	9,53	-1,25	2,07	-0,55
<b>Coef. Sesgo</b>	3,04	0,24	0,75	0,30

Fuente: La Rotta, 2018

En total se registraron 288 valores de concentraciones de Dióxido de Carbono y Temperatura durante el periodo de monitoreo. El valor máximo registrado de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el primer monitoreo fue de 861 ppm y el mínimo fue de 426 ppm, indicando un rango considerable en las concentraciones de este gas y en el aumento de las emisiones por el alto flujo vehicular que transita por el municipio. Además, estas concentraciones altas se asemejan a las condiciones que tiene el departamento en términos de emisiones de CO<sub>2</sub> que, según el IDEAM et al. (2016) se genera en un 74,35% en comparación con otros compuestos como el metano y el dióxido de nitrógeno, debido principalmente a fuentes móviles. En el segundo monitoreo el rango de concentraciones va desde los 386,10 a los 643 ppm, valores con menos dispersión y más cercanos al valor medio, de acuerdo a la desviación estándar. En general, los valores registrados de Temperatura durante los dos monitoreos no presentan mayor variación y oscilan entre los 6,7 y 21°C.

Para analizar la relación entre las variables analizadas de flujo vehicular, frente de carbonatación y Dióxido de Carbono se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson. En la Tabla 3 se muestra la correlación aplicada para el flujo vehicular y las concentraciones de Dióxido de Carbono, realizada con los valores totales de flujo vehicular y valores promedio de CO<sub>2</sub>.

**Tabla 3** Coeficiente de correlación para Flujo Vehicular y Dióxido de Carbono

CORRELACIÓN	FLUJO VEHICULAR	CO2 (ppm)
FLUJO VEHICULAR	1	
CO2 (ppm)	0,63887912	1

Fuente: La Rotta, 2018

Como se observa, el coeficiente de correlación de Pearson indica que existe una relación directa y alta, con un coeficiente de 0,638 entre el flujo vehicular transitado por el municipio de Pamplona y las concentraciones de Dióxido de Carbono registradas. La relación se ve marcada por las emisiones directas de este gas a la atmosfera por parte de los tipos de vehículos que circulan diariamente en el municipio, entre los que se destacan los buses intermunicipales y vehículos de carga pesada como camiones y mulas, sin dejar de lado el aumento considerable de los vehículos familiares y utilitarios y su aporte a las emisiones de CO<sub>2</sub>. La alta relación entre estas dos variables también indica la influencia del flujo vehicular en el comportamiento del Dióxido de Carbono en la atmosfera y en los lugares donde tiende a depositarse.

En la Tabla 4 se muestra la correlación aplicada para el frente de carbonatación anual, los valores registrados de Temperatura y Humedad relativa, y las concentraciones de Dióxido de carbono, realizada con los valores promedio anuales de estas variables.

**Tabla 4** Coeficiente de correlación para Dióxido de Carbono, Frente de carbonatación, Temperatura y Humedad Relativa

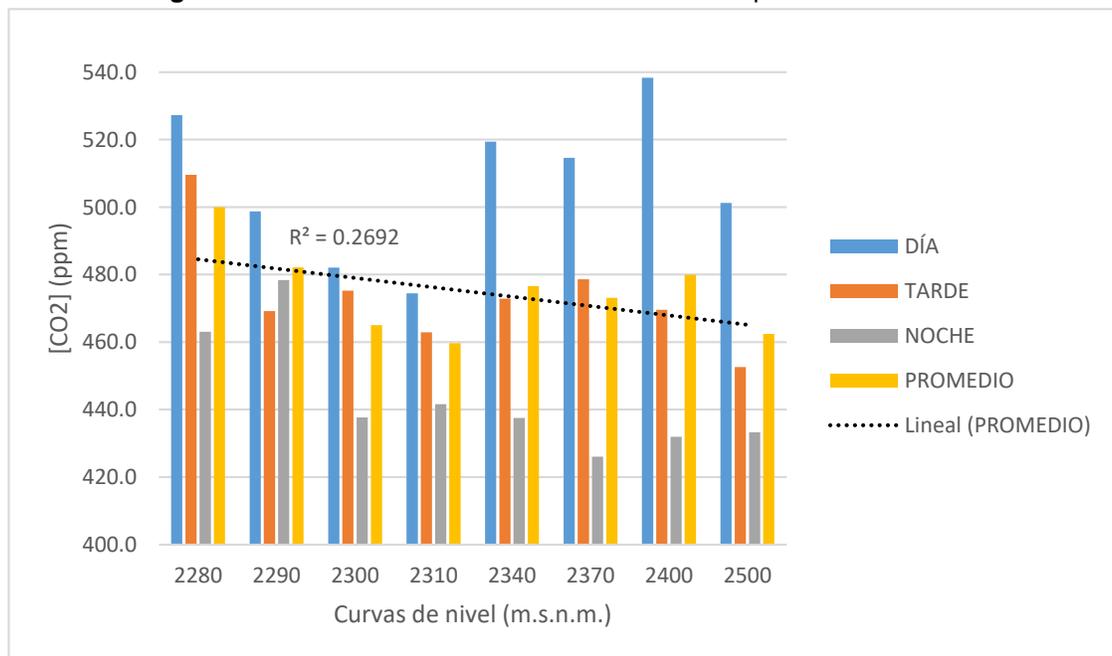
CORRELACIÓN	FRENTE(mm)	CO <sub>2</sub> (ppm)	HUMEDAD (%)	TEMPERATURA (°C)
FRENTE(mm)	1			
CO <sub>2</sub> (ppm)	0,75194234	1		
HUMEDAD (%)	0,805052931	0,820114252	1	
TEMPERATURA (°C)	-0,306567676	-0,767029141	-0,756649908	1

Fuente: La Rotta, 2018

Las variables de frente de carbonatación y concentraciones de Dióxido de Carbono presentan una relación directa y significativa, comportamiento que se corrobora con la influencia del CO<sub>2</sub> en el avance de la patología de carbonatación de las edificaciones. La relación entre el frente de carbonatación y la humedad relativa es directa y muy alta, teniendo en cuenta que la humedad relativa reacciona con el

Dióxido de Carbono generando carbonato de calcio en la estructura y, por tanto, acelerando el proceso de carbonatación. De igual forma, se presenta una relación directa y alta entre el Dióxido de Carbono y la humedad relativa, pues según lo mencionado por Valle, Pérez y Martínez (2001), citados por Correa et al. (2013), la combinación de estos agentes agresivos tiene un efecto sinérgico, acelerando el proceso de degradación del concreto y posteriormente la del acero de refuerzo que debilita las estructuras. Por otra parte, la Temperatura no presenta una relación directa con ninguna de las demás variables en análisis, en todos los casos, el coeficiente de correlación es negativo, indicando una relación inversa entre las variables y la poca influencia de la Temperatura en el proceso de carbonatación y la influencia del Dióxido de Carbono.

**Figura 35.** Concentraciones de dióxido de carbono por curva de nivel.



**Fuente:** La Rotta, 2018

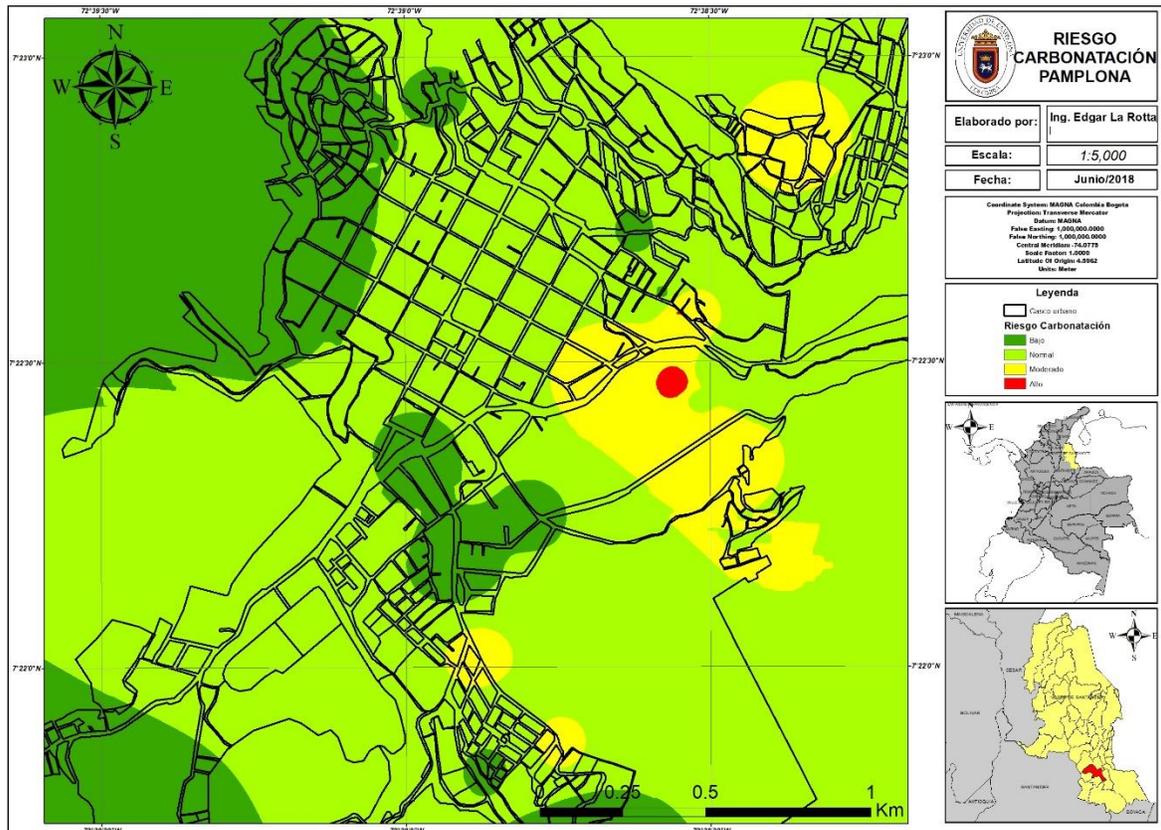
En la figura 35 se observa las concentraciones de dióxido de carbono por cada una de las curvas de nivel a las cuales realizaron monitoreo. Las mayores concentraciones en todas las curvas se presentan en el monitoreo de la mañana, en segundo lugar, en el monitoreo de la tarde y de último en el monitoreo de la noche, esto puede estar asociado a la actividad fotoquímica, además del aumento de emisiones por fuentes fijas y móviles en horas de la mañana. La línea de tendencia se estableció para el promedio de los tres monitoreos como se aprecia en la figura 35, y presenta un  $R^2$  o coeficiente de determinación de 0.2692, esto indica que el modelo no es completamente ajustado a la variable que se está analizando.

## 7.4 Mapa de riesgo por Dióxido de Carbono para el municipio de Pamplona

En este apartado se presenta el mapa de riesgo por Dióxido de Carbono realizado para el municipio de Pamplona, teniendo en cuenta las concentraciones de CO<sub>2</sub> registradas y determinadas en el apartado anterior, y la influencia de este gas sobre los frentes de carbonatación analizados en el apartado 7.2 del presente documento. Así mismo, se presenta la formulación de algunas recomendaciones a tener en cuenta, sobre todo para los constructores y la oficina de Planeación del municipio sobre la vulnerabilidad que presentan las estructuras expuestas a la patología de carbonatación de acuerdo a los rangos obtenidos de concentraciones de CO<sub>2</sub>.

En la Figura 36 se presenta el mapa de riesgo por Dióxido de Carbono para el municipio de Pamplona, elaborado a partir de la determinación del Dióxido de Carbono y teniendo en cuenta los valores obtenidos del estado del frente de carbonatación en los últimos años. De acuerdo a esto, se establecieron rangos del nivel de riesgo al que pueden verse expuestas las estructuras ubicadas a los costados de las vías principales del municipio, donde el flujo vehicular es constante.

**Figura 36** Mapa de riesgo por Dióxido de Carbono para el municipio de Pamplona



Fuente: La Rotta, 2018

En la Tabla 5 se muestran los rangos establecidos para la determinación del nivel de riesgo por Dióxido de Carbono en el municipio de Pamplona, teniendo en cuenta la relación entre las concentraciones de CO<sub>2</sub> y los valores determinados del frente de carbonatación.

**Tabla 5** Nivel de riesgo por Dióxido de Carbono y Frente de Carbonatación

NIVEL	Carbonatación (mm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
Bajo	0 - 0.5	< 460
Normal	0.5 - 1.0	460 - 490
Moderado	1.0 - 1.5	490 - 520
Alto	> 1.5	> 520

Fuente: La Rotta, 2018

De acuerdo al mapa elaborado se encontró que el sector más contaminado es el anillo localizado entre los 2280 msnm y los 2290 msnm, seguido del anillo entre los 2300 y los 2310 msnm, que corresponden a las cotas donde se presentó un nivel de riesgo alto y moderado respectivamente por CO<sub>2</sub>. La zona Norte del municipio es la que presenta los mayores niveles de riesgo, la ubicada en cercanías al Terminal de Transportes sobre la vía principal que conduce a Cúcuta, seguido del área que abarca las cotas 2300 y 2310, donde están ubicados el colegio San Francisco (Oeste) y el hospital del municipio (Este), indicando un grado de vulnerabilidad mayor en esta zona respecto a las estructuras apostadas sobre la vía principal y que presentan un frente de carbonatación mayor a 1,5 mm.

Por otra parte, se observa un nivel de riesgo normal en toda la zona del centro histórico del municipio y la zona Sur-Este, con concentraciones de CO<sub>2</sub> que no superan los 490 ppm. En la zona periférica del municipio se presenta un nivel de riesgo bajo, asociado a la poca influencia del flujo vehicular en estos sectores, con concentraciones menores a 460 ppm. Sin embargo, en barrios como Simón Bolívar y San Pedro se presenta un nivel de riesgo moderado (entre 490 y 520 ppm) producto de la influencia de variables como dirección y velocidad del viento que dispersan el gas contaminante hacia estas zonas.

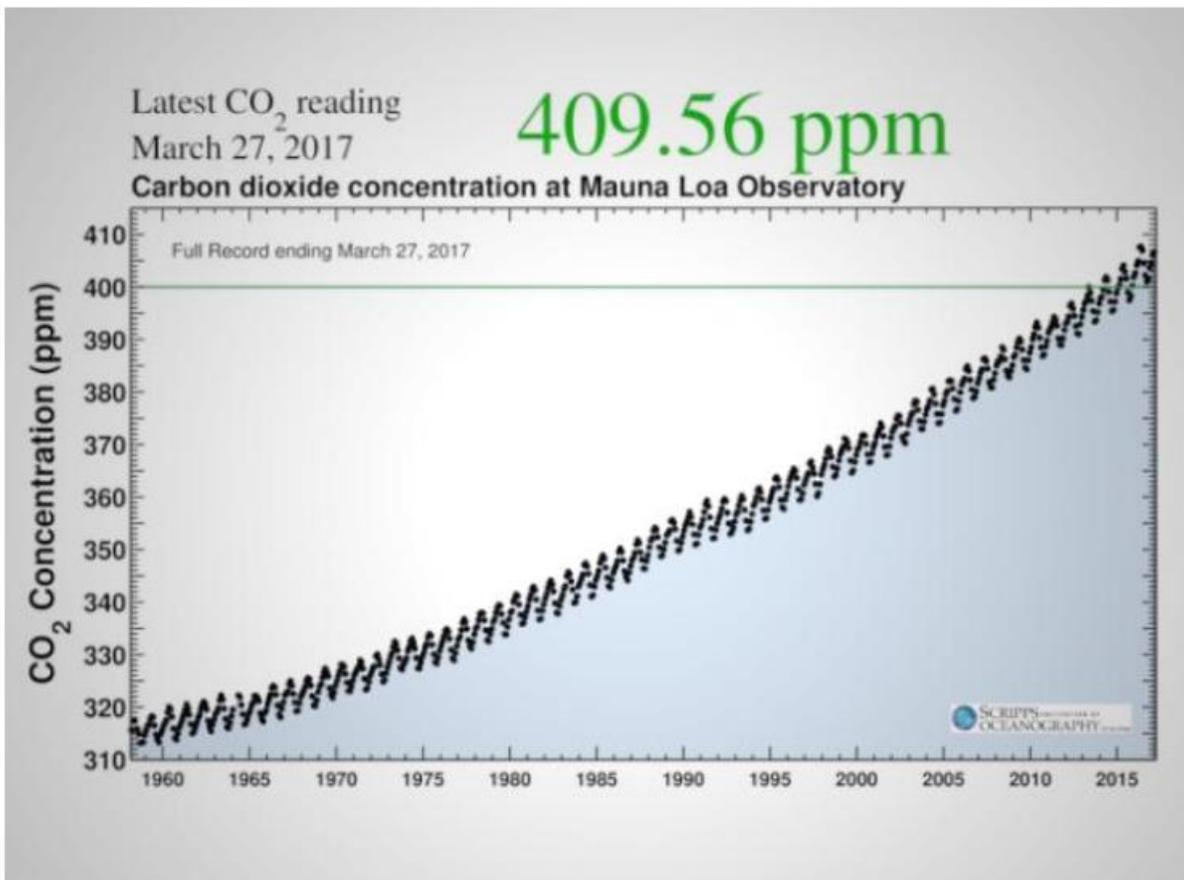
Lo anterior indica que la zona Norte del municipio de Pamplona es un punto crítico por la confluencia de las concentraciones de CO<sub>2</sub>, que, para todos los casos analizados, tienden a presentarse en mayor proporción sobre la cota 2280 msnm, comportamiento relacionado directamente al volumen de vehículos que transitan diariamente sobre esta vía principal. De acuerdo a esto, se deben tomar las medidas pertinentes para evitar el avance en los frentes de carbonatación de las edificaciones ubicadas sobre esta vía, con miras a impedir el ataque del CO<sub>2</sub> que

pueda provocar la corrosión o despasivación del acero de refuerzo y, por ende, ocasionar un deterioro grave de la estructura e incluso su colapso.

## 7.5 Comparación de la evolución del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) mundial

El aumento del gas CO<sub>2</sub> pasó de ser una simple estadística a ocupar la atención de gobiernos a nivel mundial, la tendencia normal que simulaba una línea recta horizontal empezó a adquirir una pendiente hasta convertirse en exponencial, de esto modo, de seguir así la situación y las políticas que aborden verdaderas soluciones a esta problemática ambiental deber ser no solamente técnica sino política, de lo contrario la curva pasará a ser una línea vertical que ocasionará sin lugar a dudas verdaderas catástrofes humanas parecidas a otras reacciones propias de la naturaleza como los huracanes, los terremotos, los deslizamientos, las inundaciones, entre otros. En la siguiente figura se muestra la curva de CO<sub>2</sub> utilizada en mayor proporción por los académicos. Se aprecia la curva de contaminación del observatorio Mauna Loa en el pacifico tomando cada vez más valor sobre el eje vertical.

**Figura 37.** Concentración de dióxido de carbono en el observatorio Mauna Loa.



**Fuente:** Observatorio Mauna Loa.

En esta figura el lector puede comparar los valores obtenidos para las mediciones realizadas en la ciudad de Pamplona y la tendencia mundial, lo cual indica que no estamos lejos del promedio anual.

Las medidas a tomar en cuanto a lo político y ambiental deben ser inmediatas para evitar el daño en la salud humana y para el caso de la presente investigación, para disminuir el daño prematuro en edificaciones, que conllevan al igual que otros fenómenos a la pérdida de vidas humanas.

## 8. CONCLUSIONES

Las incidencias del grado de contaminación del dióxido de carbono presentan una relación directa sobre el aumento desmedido de procesos patológicos a través del fenómeno de la carbonatación del hormigón y de la despasivación del acero de refuerzo, los cuales se constituyen en riesgo de colapso prematuro de las edificaciones amenazadas.

Los resultados mostraron que al término del tiempo de exposición de las edificaciones analizadas en estos puntos se presentaron frentes de carbonatación en todos los puntos de medición, comportamiento que evidencia la influencia de las concentraciones de Dióxido de carbono emitido por el alto flujo vehicular que transita por las principales vías del municipio de Pamplona.

Las emisiones de este contaminante provenientes del flujo de aproximadamente 37173 vehículos deterioran de forma lesiva las edificaciones construidas con concreto tradicional y con acero de refuerzo.

En el análisis de las edificaciones expuestas a la carbonatación por Dióxido de Carbono se obtuvo que para todos los casos analizados se presentan frentes de carbonatación, aunque aún no se presenta el proceso de despasivación del acero en los años analizados. Sin embargo, de continuar aumentando las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el municipio puede ocurrir a mediano plazo esta patología y generar riesgos estructurales.

De acuerdo a los resultados obtenidos, las concentraciones de Dióxido de Carbono confluyen hacia la zona Norte del municipio de Pamplona, en cercanías al Terminal de Transportes Pamplona sobre la vía que conduce a Cúcuta, zona de gran tránsito de vehículos de distinto tipo, entre los que se destacan los buses intermunicipales y los vehículos de carga pesada. Además, se registró un frente de carbonatación considerable en esta zona, a causa de la influencia del Dióxido de Carbono que tiende a acumularse en este punto.

La zona Norte del municipio de Pamplona presenta un nivel de riesgo de moderado a alto debido a las altas concentraciones de Dióxido que se registraron, indicando que es un punto crítico por contaminación de CO<sub>2</sub> a causa de la influencia del flujo vehicular transitado por la vía a Cúcuta y se deben tomar las medidas necesarias para evitar un avance rápido en la carbonatación y la posterior despasivación del acero de refuerzo de las edificaciones apostadas sobre este corredor vial.

Se presentó una relación directa entre el flujo vehicular que transita por las principales vías del municipio y las concentraciones de Dióxido de Carbono registradas, relación que se justifica en las emisiones constantes de este gas por parte de la quema de combustibles fósiles llevada a cabo en vehículos de distinto

tipo, sobre todo en los de carga pesada y buses intermunicipales de modelos antiguos.

La relación entre el frente de carbonatación y las concentraciones de Dióxido de Carbono es directa y muy alta, corroborando la influencia de este gas contaminante sobre los procesos de patología estructural. Además, se evidenció una alta relación entre estas variables y la Humedad Relativa, que reacciona con el Dióxido de Carbono para generar carbonato de calcio y acelerar el proceso de carbonatación en las edificaciones. Por otra parte, se presentó una relación indirecta entre la temperatura y las demás variables en análisis, indicando su poca influencia y dependencia respecto al fenómeno de carbonatación.

El trabajo de medición que se realizó define una alteración del ciclo normal de la patología analizada, si bien es cierto que el fenómeno es casi que normal y algunas veces inevitable por varias razones, también lo es el hecho de que las relaciones encontradas no son normales y el avance ha sido considerable en los últimos años y de seguir la tendencia de este comportamiento se puede presentar corrosión en el acero de refuerzo o la patología de despasivación.

## 9. RECOMENDACIONES

Los resultados definen la problemática asociada al fenómeno y proponen medidas y soluciones a corto y largo plazo mediante la protección prematura del concreto reforzado en las edificaciones expuestas y con frentes de carbonatación altos, sobre todo las ubicadas en las zonas críticas o donde se presentaron mayores concentraciones de Dióxido de Carbono.

Realizar un análisis más detallado de carbonatación y despasivación del acero, incluyendo otros métodos para la medición, como los electroquímicos que han tenido resultados favorables y certeros en diversas investigaciones, y teniendo en cuenta otros agentes que intervienen en el proceso de carbonatación como los sulfatos, sales de amonio y magnesio, óxidos de azufre, entre otros. Además, es importante analizar la influencia de variables meteorológicas como la humedad relativa y la precipitación, que contribuyen a acelerar el proceso de reacción de los compuestos con el concreto y, por ende, la patología estructural.

Las medidas a tener en cuenta para evitar la carbonatación nacen desde la misma elaboración del concreto porque de la etapa de aplicación del cemento al concreto ya implícitamente se adhiere una porción de carbonatación porque el cemento lleva trazas pequeñas de carbonatación por contaminación o exposición al Dióxido de Carbono y como se termina protegiendo el elemento con distintos métodos las trazas desaparecen dentro de la misma masa de concreto.

Respecto a la parte de construcción de las obras civiles y edificaciones es recomendable utilizar el momento del vaciado del concreto en el menor tiempo posible.

Una vez se desencofran los elementos estructurales o formateo, proceder inmediatamente a realizar una protección con polímero, plástico, pintura cementante que proteja la estructura mientras se continúa con el siguiente proceso: el acabado por medio de estuco.

Es importante reducir la contaminación y focos de la contaminación por Dióxido de Carbono, ampliar piso y placa y aumentar los días sin carro en el municipio, implementar un piso y placa ambiental, capacitar a los maestros y oficiales de obras en el tema de carbonatación y sus implicaciones en el diseño de estructuras.

Realizar una protección temporal de las estructuras y edificaciones y luego, pasar de forma inmediata al acabado y realizar un control periódico anual con el fin de detectar a tiempo las patologías estructurales.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguirre, A.M y Mejía, R. (2013). Durabilidad del hormigo armado expuesto a condiciones agresivas. *Materiales de Construcción*, vol. 63 (309), pp. 7-38.

Alandete B, L. C y Romero B, D. (2016). *Factores de emisión por efecto de la movilidad vehicular en ciudades con similares condiciones a Cartagena de Indias, Colombia* (Tesis de especialización). Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias, Colombia.

Alcaldía de Pamplona. (2015). Plan Básico de Ordenamiento Territorial municipio de Pamplona. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Álvarez, V. (2015). Estimación de los factores de emisión para CO y PM 2.5 generados por el tráfico vehicular en la ciudad de Cartagena. Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias, Colombia.

Álvarez C, M. (2017). La carbonatación del concreto: Un problema en un mundo industrializado. Recuperado el 5 de junio de 2018 de: <https://es.linkedin.com/pulse/la-carbonataci%C3%B3n-del-concreto-un-problema-en-mundo-alvarez-cardenas>

Aperador C, W., Gordillo, M y Bautista, J. (2013). Evaluación de la corrosión del acero embebido en concreto AAS, expuesto a carbonatación mediante un experimento factorial con medidas repetidas. *Ingeniería y Ciencia*, vol. 9 (17), pp. 237-260.

ARGOS. (2012). 360° en concreto. Recuperado el 5 de junio de 2018 de: <http://360gradosblog.com/index.php/carbonatacion-del-concreto-como-detectarla/#stash.YmHmh7b5.dpuf>.

Avendaño R, E. (2006). *Detección, tratamiento y prevención de patologías en sistemas de concreto estructural utilizados en infraestructura industrial* (Tesis de pregrado). Escuela de Ingeniera Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

Berdugo A, J y Ramírez R, D. (2016). *Incidencia del flujo vehicular en la calidad del aire en sitios críticos por población, movilidad y características geométricas de las vías en la ciudad de Cartagena* (Tesis de pregrado). Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias, Colombia.

Broto, C. (2010). Enciclopedia Broto de Patologías de la construcción. Recuperado de [https://higieneysseguridadlaboralcvs.files.wordpress.com/2012/07/enciclopedia\\_brot\\_o\\_de\\_patologias\\_de\\_la\\_construccion.pdf](https://higieneysseguridadlaboralcvs.files.wordpress.com/2012/07/enciclopedia_brot_o_de_patologias_de_la_construccion.pdf)

- Callejas, D y Mariotta, E. (2013). *Estudio de Movilidad en zonas de alto impacto vehicular en Pamplona* (Tesis de pregrado). Programa de Ingeniería Civil. Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.
- Calvo A, R. A y Sierra L, M. A. (2015). *Proceso de carbonatación de los concretos hidráulicos para pavimento rígido* (Tesis de especialización). Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias, Colombia.
- Carvajal, A.M., Silva, C., Valiente, J y Vanegas, A. (2007). Efectos de la carbonatación acelerada en distintos tipos de cemento y hormigones. *Revista de la Construcción*, vol. 6 (1), pp. 88-97.
- Chávez U, E., Pérez L, T., Reyes T, J y Corvo P, F. (2013). Deterioro de estructuras de concreto por carbonatación en medio ambiente marino tropical y cámara de carbonatación acelerada. *Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia*, vol. 36 (2), pp.104-113.
- Congreso de Colombia. (2010). Ley 1383 de 2010. Bogotá D.C, Colombia.
- Correa, E., Montoya, R., Peñaranda, S., Echeverría, F y Castaño, J. G. (2008). Deterioro atmosférico del concreto en ambientes urbanos colombianos de diferente agresividad. *Revista Científica Investigación y Desarrollo*, (23). Recuperado de <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/1560/4459>
- Estupiñán D, H. A., Peña B, D. Y., Vásquez Q, C y Mejía C, E. F. (2008). Método electroquímico para evaluar el efecto de la contaminación por CO<sub>2</sub> sobre el deterioro de estructuras de concreto reforzado en la costa del pacífico colombiano. *Boletín Científico CCCP* (15), pp. 23-31.
- Fontana, M. G. (1986). *Corrosion Engineering*. Mc Graw Hill. Nueva York.
- Galán G, I., Andrade P, C., Prieto R, M., Mora P, P., López, J. C y Sanjuán B, M. A. (2010). Estudio del efecto sumidero de CO<sub>2</sub> de los materiales de base cemento. *Revista Técnica CEMENTO HORMIGÓN*, (939), pp. 70-83.
- Galán G, I. (2011). *Carbonatación del hormigón: combinación de CO<sub>2</sub> con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH* (Tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.
- Gasteiz, V. (2007). Estudio de movilidad y espacio público. Recuperado de: <http://www.bcnecologia.net/es/proyectos/plan-de-movilidad-y-espacio-publico-de-vitoria-gasteiz>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2016). Inventario Nacional y Departamental de Gases Efecto Invernadero-Colombia. Tercera Comunicación Nacional Cambio Climático. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM. Bogotá D.C, Colombia.

López R, F., Rodríguez R, V., Santa Cruz A, J., Torreño G, I y Ubeda de Mingo, P. (2004). Manual de patología de la edificación. Departamento de Tecnología de la edificación. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

Márquez, G., Alejandre, F. J., Del Rio, J. J., Arribas, R y Blasco, F. J. (2011). Ataque del anhídrido carbónico y el ácido sulfhídrico sobre pastas de cemento API clase H expuestas a aguas de formación salina. *Materiales de Construcción*, vol. 61 (303), pp.371-384.

Mindess, S y Young, J.F. (1981). Concrete. Prentice Hall. Nueva Jersey.

Ministerio de Ambiente, Vivienda Desarrollo Territorial. (2008). Resolución 910 de 2008. Bogotá D.C, Colombia.

Ministerio de Ambiente, Vivienda Desarrollo Territorial. (2010). Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10. Bogotá D.C, Colombia.

Ministerio de Transporte. (2002). Ley 769 de 2002 “Código Nacional de Tránsito Terrestre”. Bogotá D.C, Colombia.

Monje L, C. A y Rodríguez V, D. J. (2016). *Carbonatación acelerada en agregados reciclados de concreto y evaluación de su desempeño en mezclas de concreto para vías* (Tesis de maestría). Maestría en construcción de obras viales, Universidad Santo Tomas. Bogotá D.C, Colombia.

Montani, R. (2000). La carbonatación, enemigo olvidado del concreto. *Revista Construcción y Tecnología*. México D.F.

Moreno, E. I., Cob E y Castro B, P. (2004). Corrosion rates from carbonated concrete specimens. *Corrosion NACE* (004439).

Olavarrieta P, M., Pérez R, A., Bolognini, H y González, D. (2014). Estudio de probetas de hormigón expuestas en ambiente acelerado con un recubrimiento protector y decorativo con base en resinas acrílicas. Congreso latinoamericano sobre “Patología de la construcción, tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio”. Universidad de Cantabria, España.

Peña B, D. Y., Estupiñan D, H., Vásquez Q, C y Mejía C, E. (2011). Determinación de la despasivación en varillas de acero de refuerzo en solución poro de agua de mar por medio de técnicas electroquímicas. *Prospect*, vol. 9 (1), pp. 13-20.

Prada C, D. J. (2014). *Evaluación de la presencia de carbonatación en puentes vehiculares de concreto, localidades de Usaqué y Fontibón* (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia. Bogotá D.C, Colombia.

Quintero Q, M. I., Solano L, C. A y Pandales L, C. A. (2013). *La degradación y el mantenimiento en las obras de edificación: estudio de caso Institución Educativa*

Antonio Derka Santo Domingo (Tesis de especialización). Especialización en Ingeniería de la Construcción, Universidad de Medellín. Medellín, Antioquia.

Saldaña R, R. (2016). *Emisión de gases por el parque automotor y su repercusión en la contaminación del aire en la ciudad de Iquitos en el año 2015* (Tesis de maestría). Programa de maestría en ingeniería química ambiental, escuela de postgrado, Universidad Nacional de Trujillo. Iquitos, Perú.

Sanjuán B, M. A y Castro B, P. (2001). Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. México D.F

Segovia, M., Yoris, A., Guilarducci, A., Defagot, C y Ulibarrie, N. (2008). Carbonatación de estructuras de hormigón armado en la Región Centro-Este Argentina: Influencia de la contaminación ambiental urbana. *Revista Tecnología y Ciencia-UTN*, (16), pp. 12-25.

Sierra B, C y Guevara A, D. (2012). Evaluación del flujo vehicular en la intersección de la carrera 70 con la calle 9 por la construcción de una vía subterránea en el aeropuerto Enrique Olaya Herrera. Escuela de Ingeniería de Antioquia. Envigado, Colombia.

Sullivan G, L., Hime, W y Dowding, C. (2007). Accelerated protocol for measurement of carbonation through a crack surface. *ELSEVIER*, pp. 916-923.

Toirac C, J. (2004). Patología de la construcción grietas y fisuras en obras de hormigón, origen y prevención. *Ciencia y Sociedad*, vol. 9 (1), pp. 72-114.

University College London y Universidad de los Andes. (2013). Caracterización de la contaminación atmosférica. Bogotá D.C, Colombia.

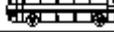
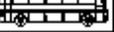
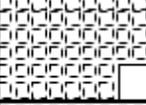
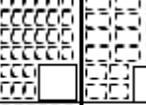
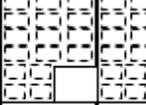
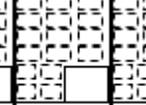
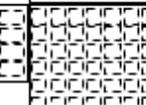
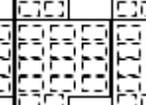
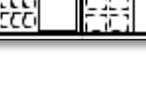
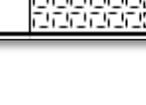
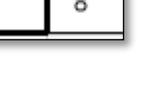
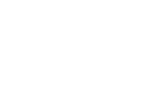
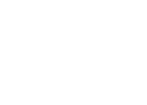
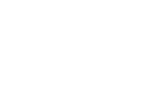
Valle, A., Pérez, T y Martínez, M. (2001). El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. *Instituto Mexicano del Transporte* (182). ISSN 0188-7297. Recuperado de <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt182.pdf>

Valencia A, V. (2007). Guía de ingeniería de tránsito. Universidad Nacional de Colombia-sede Medellín. Medellín, Colombia.

# 11. ANEXOS

## ANEXO I. FORMATOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN PRIMARIA

### Formato para aforo vehicular

		NOMBRE DE PROYECTO									REVISION 0	
		AFOROS VEHICULARES										
Fecha (D.M.A.): _____		Estación de Aforo: _____									<b>Esquema</b> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Condición Climática: _____		Movimientos Aforados: _____										
Aforador: _____		Hoja _____ de _____										
Coordinador: _____		Hora de Inicio: _____ Hora Final: _____										
PER	MOY	TAXIS 	AUTOS 	BUS INTERM 	BUSETA 	C-2P 	C-2G 	C-3-4 	C5 	≥C6 	Motos 	
												
												
												
												
												
												
OBSERVACIONES												

### Formato de datos de carbonatación

FORMATO DE DATOS DE CARBONATACIÓN				
FECHA				
PERIODO DE MEDICIÓN				
ESTACIÓN				
ALTURA DE MEDICIÓN				
ESTADO DEL TIEMPO				
DIRECCIÓN DEL VIENTO				
FRENTE (mm)	HUMEDAD (%)	TEMPERATURA (°C)	ALTURA (msnm)	OBSERVACIONES

**AFORADOR:**

--

**FORMATO DE MEDICIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>)**

FORMATO DE MEDICIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO <sub>2</sub> )												
Hora inicio:	Hora final:			Tiempo atmosférico:						Fecha:		
CURVA DE NIVEL	NORTE			ESTE			SUR			OESTE		
	[CO <sub>2</sub> ] (ppm)	T (°C)	HR (%)	[CO <sub>2</sub> ] (ppm)	T (°C)	HR (%)	[CO <sub>2</sub> ] (ppm)	T (°C)	HR (%)	[CO <sub>2</sub> ] (ppm)	T (°C)	HR (%)
2280 m.s.n.m.												
2290 m.s.n.m.												
2300 m.s.n.m.												
2310 m.s.n.m.												
2340 m.s.n.m.												
2370 m.s.n.m.												
2400 m.s.n.m.												
2500 m.s.n.m.												
OBERVACION:												

