

Evaluación de la temperatura superficial en dos puentes ubicados uno sobre la calle 26 en Bogotá (Av. Rojas con calle 26) y el otro ubicado en la Rotonda de Siberia – Cota en la Vía Bogotá – La Vega Cundinamarca

Edison E, Alvarez & Maikoll A, Alvarez

Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Antonio Nariño, Bogotá
Colombia

Maikoll Andrés Álvarez Ulloa & Edison Stiven Álvarez Ulloa

Universidad Antonio Nariño

Ingeniería Civil

Bogotá D.C

2020-2

Evaluación de la temperatura superficial en dos puentes ubicados uno sobre la calle 26 en Bogotá (Av. Rojas con calle 26) y el otro ubicado en la Rotonda de Siberia – Cota en la Vía Bogotá – La Vega Cundinamarca

Maikoll Andrés Álvarez Ulloa & Edison Stiven Álvarez Ulloa

Proyecto de investigación presentado como requisito para optar por el título de:

INGENIERA CIVIL

Director (es): Edison Osorio Bustamante, Dr.

Universidad Antonio Nariño Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

Ingeniería civil

Bogotá D.C.

2020-2

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Dedicatoria

Queremos dedicar este trabajo a nuestros padres Miriam Ulloa Sánchez y Maximiliano Alvarez Cano, a nuestros hermanos Cristian y Juan Felipe, por ser nuestro pilar fundamental de nuestra familia y ser nuestro motor para seguir adelante (Maikoll y Stiven).

Alejandra Linares por ser el apoyo incondicional, por estar siempre en los buenos y malos momentos (Maikoll Alvarez).

Agradecimientos

Queremos agradecer primeramente a Dios por permitirnos culminar esta bonita carrera, esta etapa tan importante en nuestras vidas, de igual manera queremos agradecer a nuestros padres por su apoyo incondicional, por sus palabras de aliento, por ser nuestro mejor ejemplo a seguir y que gracias a ellos hoy estamos cumpliendo nuestras metas, también queremos darle las gracias a todas las personas que durante el transcurso de esta etapa estuvieron ahí, como lo son nuestros compañeros de la UAN, nuestros familiares, nuestros amigos y a los personas que con mucho interés compartieron sus conocimientos para que nosotros seamos profesionales idóneos, nuestros más sinceros agradecimientos a nuestros docentes de la Universidad Antonio Nariño.

También le queremos dar un agradecimiento especial a Edison Osorio Bustamante nuestro director de proyecto de grado, gracias por su orientación, por compartir sus conocimientos y ayudarnos a culminar nuestra carrera.

Resumen

En el diseño de estructuras como los puentes es importante tener en cuenta diferentes características que pueden influir en su construcción, como el tipo de estructura que sea más conveniente, los materiales idóneos entre otros muchos factores que se puedan presentar.

Para nuestro tema de investigación hemos tomado como punto de inicio el análisis del gradiente térmico en dos estructuras tipo puente vehicular y cuál es la influencia que esta tiene en la estructura, para ello se ha realizado una campaña de toma de datos in situ durante un periodo de 20 días en cada puente y se realizó el respectivo análisis de cada uno, de igual manera se realizó una modelación numérica con datos obtenidos de la estación meteorológica El Dorado, una vez hecho el análisis de ambos grupos de datos se compararon obteniendo resultados similares en los dos lugares y que nos permiten tener un concepto claro de cómo actúa la temperatura y los efectos que esta puede producir en la estructura cuando hace que se expanda y se contraiga como consecuencia de los cambios de temperatura.

El objetivo de este proyecto es recopilar datos de la influencia del gradiente térmico en estas estructuras, puesto que en Colombia falta en la normativa reglamentar los factores a tener en cuenta al momento de realizar estos diseños.

Palabras Clave: Puente, Temperatura, Radiación, Conducción, Convección.

Abstract

In the design of structures such as bridges, it is important to take into account different characteristics that can influence their construction, such as the type of structure that is most convenient, the ideal materials, among many other factors that may arise.

For our research topic we have taken as a starting point the analysis of the thermal gradient in two vehicle bridge-type structures and what is the influence that this has on the structure, for this a data collection campaign has been carried out in situ for 20 days on each bridge and the respective analysis of each one was carried out, in the same way a numerical modeling was, a carried out with data obtained from the El Dorado meteorological station, once the analysis of both groups of data was compared obtaining similar results in both places and that allow us to have a clear concept of how temperature acts and the effects that it can produce on the structure when it causes it to expand and contract as a result of temperature changes.

The objective of this project is to collect data on the influence of the thermal gradient in these structures, since in Colombia there **is no regulated** regulation of the factors to take into account when making these designs.

Keywords: Bridge, Temperature, Radiation, Conduction, Convection.

Contenido

1.	Introducción.....	1
2.	Justificación.....	2
3.	Objetivos.....	3
3.1.	Objetivo General.....	3
3.2.	Objetivos Específicos.....	3
4.	Marco Teórico.....	4
4.1.	Efectos de la temperatura en puentes.....	4
4.2.	Puente.....	6
4.2.1.	Puentes Fijos.....	6
4.2.2.	Puentes Móviles.....	8
4.2.3.	Según El Material Del Que Son Hechos.....	10
4.2.4.	Puentes Metálicos.....	11
4.3.	Temperatura.....	12
4.4.	Calor.....	12
4.5.	Transferencia de Calor.....	13
4.5.1.	Conducción.....	13
4.5.2.	Convección.....	14
4.5.3.	Radiación.....	15
4.6.	Dilatación.....	17
4.6.1.	Dilatación Lineal.....	17
4.6.2.	Dilatación Superficial.....	18
4.6.3.	Dilatación Volumétrica.....	19
5.	Estado Del Conocimiento.....	19
6.	Metodología.....	24
6.1.	Paso 1.....	24
6.1.1.	Puente Av. Rojas con calle 26 – Bogotá.....	24
6.1.2.	Puente Siberia Cota.....	25
6.2.	Paso 2.....	26
6.2.1.	Puente Av. Rojas con Calle 26.....	27
6.2.2.	Puente Siberia Cota, Vía Bogotá – La Vega.....	31
6.3.	Paso 3.....	35

6.4.	Modelación numérica	37
7.	Resultados.....	42
7.1.	Análisis Puente Av. Rojas con Calle 26.....	42
7.2.	Análisis Puente Siberia Cota.....	52
8.	Temperatura superficial.....	62
8.1.	Puente Av. Rojas con Calle 26.....	62
8.2.	Puente Siberia Cota.....	66
8.3.	Comparación de los puentes y discusión.....	70
8.4.	Según la norma	73
9.	Conclusiones	77
10.	Referencias Bibliograficas	79

Lista de Figuras

Figura 1 Gradiente térmico. Elaboración propia.....	5
Figura 2 Puente Arco, Tomada de: Introducción al diseño de puente	7
Figura 3 Puente Colgante Tomado de: Diseño de Puentes	8
Figura 4 Puente Giratorio Tomado de: Diseño de Puentes.....	9
Figura 5 Puente de Madera. Tomado de: Diseño de Puentes	10
Figura 6 Puente en Hormigón Pre-esforzado. Tomado de: Introducción al Diseño de Puentes...	11
Figura 7 Conducción. Tomada de Física Sarmiento	14
Figura 8 Convección. Tomada de: Calor y Temperatura.....	15
Figura 9 Radiación Tomada de; Yunus A. Cengel	16
Figura 10 Dilatación Lineal. Termodinámica sistemas aeronáuticos.	18
Figura 11 Dilatación Superficial. Termodinámica sistemas aeronáuticos.....	19
Figura 12 Dilatación Superficial. Termodinámica sistemas aeronáuticos.....	19
Figura 13 Documentos por año. Obtenida de: Scopus - Document search, n.d	20
Figura 14 Documentos por autor. Obtenida de: Scopus - Document search, n.d.....	21
Figura 15 Documentos por país. Obtenida de: Scopus - Document search, n.d.....	21
Figura 16 Elevación Pórticos. Tomada de Webidu	25
Figura 17 Puente Siberia-Cota Fuente: Fuente Propia.....	26
Figura 18 Puente Siberia - Cota. Fuente: Fuente Propia.....	26
Figura 19 Puente Av. Rojas con Calle 26. Fuente Propia.....	27
Figura 20 Puente Av. Rojas con Calle 26. Fuente Propia.....	28
Figura 21 Puente Av. Rojas con Calle 26. Fuente Propia.....	29
Figura 22 Puente Av. Rojas con Calle 26. Fuente Propia.....	30
Figura 23 Puente Siberia Cota. Fuente Propia	31
Figura 24 Puente Siberia Cota. Fuente Propia	32
Figura 25 Puente Siberia Cota. Fuente Propia.	33
Figura 26 Puente Siberia Cota. Fuente Propia.	34
Figura 27 Grafica Meteorológicas de Bogotá, septiembre. tomada de:(Bogotá, Colombia Weather History Weather Underground, n.d.)	35
Figura 28 Grafica Meteorológicas de Bogotá, octubre. tomada de:(Bogotá, Colombia Weather History Weather Underground, n.d.)	36

Figura 29 Grafica Radiacion Solar Bogotá. Elaboración Propia. Datos obtenidos de: (Tiempo promedio el 26 de septiembre en Aeropuerto El Dorado, Colombia - Weather Spark, n.d.)	36
Figura 30 Radiación solar 26 de septiembre. Obtenida de:(Tiempo promedio el 26 de septiembre en Aeropuerto El Dorado, Colombia - Weather Spark, n.d.).....	37
Figura 31 Equilibrio Térmico en el puente. Adaptado de: Patarroyo & Meneces 2020.....	38
Figura 32 Punto 1 Tablero Sentido Norte - Sur Puente Av. Rojas con Calle 26. Obtenido de: Software FLIR TOOLS.....	43
Figura 33 Punto 2 Tablero Sentido Norte - Sur Puente Av. Rojas con Calle 26. Obtenido de: Software FLIR TOOLS.....	44
Figura 34 Punto 3 Parte inferior Puente Av. Rojas con Calle 26. Obtenido de: Software FLIR TOOLS.....	45
Figura 35 Punto 4 Parte inferior Puente Av. Rojas con Calle 26. Obtenido de: Software FLIR TOOLS.....	46
Figura 36 Punto 1 Temperatura Promedio Tablero Superior Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia.....	47
Figura 37 Punto 1 Temperatura Promedio Bordillo Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia	47
Figura 38 Punto 2 Temperatura Promedio Tablero Superior Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia.....	48
Figura 39 Punto 2 Temperatura Promedio Bordillo Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia	48
Figura 40 Punto 3 Temperatura Promedio Viga Pórtico Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia.....	49
Figura 41 Punto 3 Temperatura Promedio Viga Cajón Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia.....	49
Figura 42 Punto 4 Temperatura Promedio Viga Pórtico Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia.....	50
Figura 43 Punto 4 Temperatura Promedio Viga Cajón Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia.....	50
Figura 44 Registro de mayor temperatura. Obtenido de:(Bogotá, Colombia Weather History Weather Underground, n.d.)	51

Figura 45 Punto 1 Tablero Puente Siberia Cota. Obtenido de: Software FLIR TOOLS.....	52
Figura 46 Punto 2 Tablero Puente Siberia Cota. Obtenido de: Software FLIR TOOLS.....	53
Figura 47 Punto 3 Tablero Inferior Puente Siberia Cota. Obtenido de: Software FLIR TOOLS.	54
Figura 48 Punto 4 Tablero Inferior Puente Siberia Cota. Obtenido de: Software FLIR TOOLS.	55
Figura 49 Punto 1 Tablero Superior Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.	56
Figura 50 Punto 1 Bordillo Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.	57
Figura 51 Punto 2 Tablero Superior Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.	57
Figura 52 Punto 2 Bordillo Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.	58
Figura 53 Punto 3 Tablero Inferior Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.....	58
Figura 54 Punto 3 Tablero Borde Exterior Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.	59
Figura 55 Punto 4 Tablero Inferior Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.....	59
Figura 56 Punto 4 Tablero Borde Interno Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.	60
Figura 57 Registro de mayor temperatura. Obtenido de:(Bogotá, Colombia Weather History Weather Underground, n.d.)	61
Figura 58 Temperatura Superficial de la Mañana Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia.	62
Figura 59 Temperatura Superficial de la Tarde Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia.	63
Figura 60 Comparación Temperatura Superficial T1 vs. In Situ AM Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia.....	64
Figura 61 Comparación Temperatura Superficial T1 vs. In Situ PM Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia.....	64
Figura 62 Comparación Temperatura Superficial T3 vs. In Situ AM Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia.....	65
Figura 63 Comparación Temperatura Superficial T3 vs. In Situ PM Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia.....	65
Figura 64 Temperatura Superficial de la Mañana Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.	66
Figura 65 Temperatura Superficial de la Tarde Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.....	67
Figura 66 Comparación Temperatura Superficial T1 vs. In Situ AM Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.....	68

Figura 67 Comparación Temperatura Superficial T1 vs. In Situ PM Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.....	68
Figura 68 Comparación Temperatura Superficial T3 vs. In Situ AM Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.....	69
Figura 69 Comparación Temperatura Superficial T3 vs. In Situ PM Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.....	69
Figura 70 Comparación temperatura máxima In situ AM Puente Siberia vs. Puente Av. Roja con Calle 26	70
Figura 71 Comparación temperatura mínima In situ AM Puente Siberia vs. Puente Av. Roja con Calle 26	71
Figura 72 Comparación temperatura máxima In situ PM Puente Siberia vs. Puente Av. Roja con Calle 26	71
Figura 73 Comparación temperatura mínima In situ PM Puente Siberia vs. Puente Av. Roja con Calle 26	72
Figura 74 Puente Av. Rojas con Calle 26. Fuente Propia.....	75
Figura 75 Puente Av. Rojas con Calle 26. Fuente Propia.....	76

Lista De Tablas

Tabla 1 Calores Especificados para Materiales. Tomada de: Termodinámica de los Sistemas Aeronáuticos	12
Tabla 2 Comparación temperaturas In situ. Elaboración propia	72
Tabla 3 Comparación temperaturas por método de modelación. Elaboración propia	73
Tabla 4 Intervalos de Temperatura Procedimiento A. Adaptado de: Norma Colombiana de Diseño de Puentes.	74

1. Introducción

Los puentes durante muchos años le han servido a la humanidad como la mejor alternativa para evitar tramos que afectan directamente el desarrollo de una comunidad, lo que ha llevado a que este tipo de estructuras se lleguen a construir en los lugares más inhóspitos de la tierra donde se pueden presentar desde las temperaturas más elevadas, hasta temperaturas bajo cero, con la elaboración de este proyecto se pretende realizar el análisis de las variaciones de temperatura que se presentan en el puente de la Av. Rojas con Calle 26 y en el puente de Siberia Cota, teniendo en cuenta diferentes variables como la radiación, la velocidad del viento, la irradiación, conducción, convección y estudiar cómo se presentan estas en la estructura del puente y cuáles son los efectos que generan a largo plazo.

Este trabajo es relevante ya que en Colombia no se cuenta con un documento de consulta donde se encuentren los aspectos a tener en cuenta en cuanto a la influencia del gradiente térmico en los puentes, también, es importante el desarrollo de este proyecto porque en un futuro puede contribuir a otros estudiantes, profesores, entidades que les interese el tema o a futuros diseños de este tipo de estructuras y puede ayudar con el mejoramiento de los materiales que se utilicen.

Es por eso el planteamiento de este proyecto ya que con los datos obtenidos podemos hacer un análisis más detallado y determinar cómo es el comportamiento de la estructura cuando está expuesta a las variaciones de temperatura.

El documento evidencia el trabajo desarrollado durante dos semestres con el objetivo de analizar el gradiente térmico en los tableros de dos puentes: uno de ellos ubicado en la ciudad de Bogotá y el otro en el municipio de Cota, Cundinamarca. Se recopila información práctica tomada in situ durante 20 días, manejando en promedio, la toma en los mismos horarios, para generar valor al estudio.

Posterior a la toma de los datos, se genera el análisis que permite identificar los picos de la variable en estudio: el gradiente de temperatura. Lo que sirve como input de información principal para análisis de datos numérico y gráfico. Donde se hallan diferentes resultados, que pueden ser tomados para generar comparativos en estudios posteriores y para concluir en relación con los objetivos planteados.

2. Justificación

Las obras civiles en Colombia, por innumerables proyectos fallidos se han relacionado estrechamente con la corrupción: deterioro prematuro en vías, proyectos sin cumplimiento de tiempos o, específicamente, la caída de puentes. Estos últimos, denominados como estructuras con objetivos claros de comunicación, disminución en el flujo vehicular y un posible salvamento al tráfico incontrolable.

Si se cuestiona sobre las razones por las que, estructuras como estas no cumplen con su cometido, se deterioran o, en el peor de los casos se desploman se podrían enlistar motivos como: uso de materiales de baja calidad, diseños estructurales precarios, topografía del terreno, entre otros. Pero, no es usual que, en la construcción de estas estructuras estrictamente se genere un estudio de las temperaturas que posiblemente maneje la estructura, lo que, implícitamente permite identificar la inexistencia de un control de esta importante variable: la temperatura.

Pues bien, aunque no se genere este estudio, son varios los efectos negativos que podrían preverse si se tomara estudio como obligatoriedad. Dentro de dichos efectos, a grandes rasgos se pueden mencionar la expansión y contracción de las estructuras. Al analizarlo de manera paralela, para cualquier tipo de proyecto relacionado con este tipo de construcción el generar estudios del gradiente de temperatura le permitirá ejercer un porcentaje de control en variables como la ya mencionada expansión y contracción, la cual debe ser estudiada según los tipos de mazos usados.

Si bien son incontables las variables que influyen en el éxito de la construcción de un puente, entre mayor sea la cantidad de variables en las que se ejerce siquiera un poco de control, le asegurará, de cierto modo, una probabilidad mayor de duración y calidad.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Evaluar de la temperatura superficial en dos puentes ubicados uno sobre la calle 26 en Bogotá (Av. Rojas con calle 26) y el otro ubicado en la Rotonda de Siberia – Cota en la Vía Bogotá – La Vega Cundinamarca.

3.2. Objetivos Especificos

Realizar una campaña de mediciones diarias de la temperatura en los puentes, uno en la calle 26 de Bogotá y el otro en Siberia – Cota en la Vía Bogotá – La Vega Cundinamarca usando una cámara térmica durante un periodo de tiempo mínimo de 20 días.

Estimar la temperatura superficial de los tableros por medio de un modelo numérico y apoyándonos de datos de sensores meteorológicos con el fin de compararlos con las mediciones obtenidas en campo.

4. Marco Teórico

Los puentes de tránsito vehicular durante años han ido evolucionando su estructura con el fin de presentar un óptimo servicio a quienes hacen uso de ellos, y dependiendo de su lugar de construcción se necesita que cumplan con algunas especificaciones para evitar en lo posible daños tanto a la estructura, como al medio en el que se construyen, a continuación se presentan distintos tipos de estructuras, de igual manera se dan a conocer diferentes variables a las que están sometidos y cuáles son los efectos que estas producen y las consecuencias que pueden acarrear de no tener una buena ejecución.

4.1. Efectos de la temperatura en puentes

Las cargas térmicas en los puentes son un fenómeno natural al que están sometidos a diario estas estructuras y que con el pasar del tiempo pueden tener algunos cambios debido a las temperaturas efectivas que se ejercen sobre estos y que pueden causar expansión o contracción de la cubierta durante el tiempo en el que va a estar en uso (Childs, 2020).

Por eso es importante conocer los tipos de temperatura que hay y cómo intervienen estas en las estructuras y cuáles son efectos que presentan al estar expuestos a ellas, también debemos determinar un promedio de temperatura, puesto que cuando hay una temperatura elevada esta produce una expansión del tablero del puente y cuando está por debajo del promedio de temperatura se presenta una contracción del tablero, de acuerdo con lo anterior debemos tener un mejor conocimiento de que es lo que estamos analizando y como se presentan estas alteraciones (Childs, 2020).

En la figura 1 se muestra el gradiente térmico y los diferentes tipos de transferencia de calor y los efectos que estos generan en los puentes.

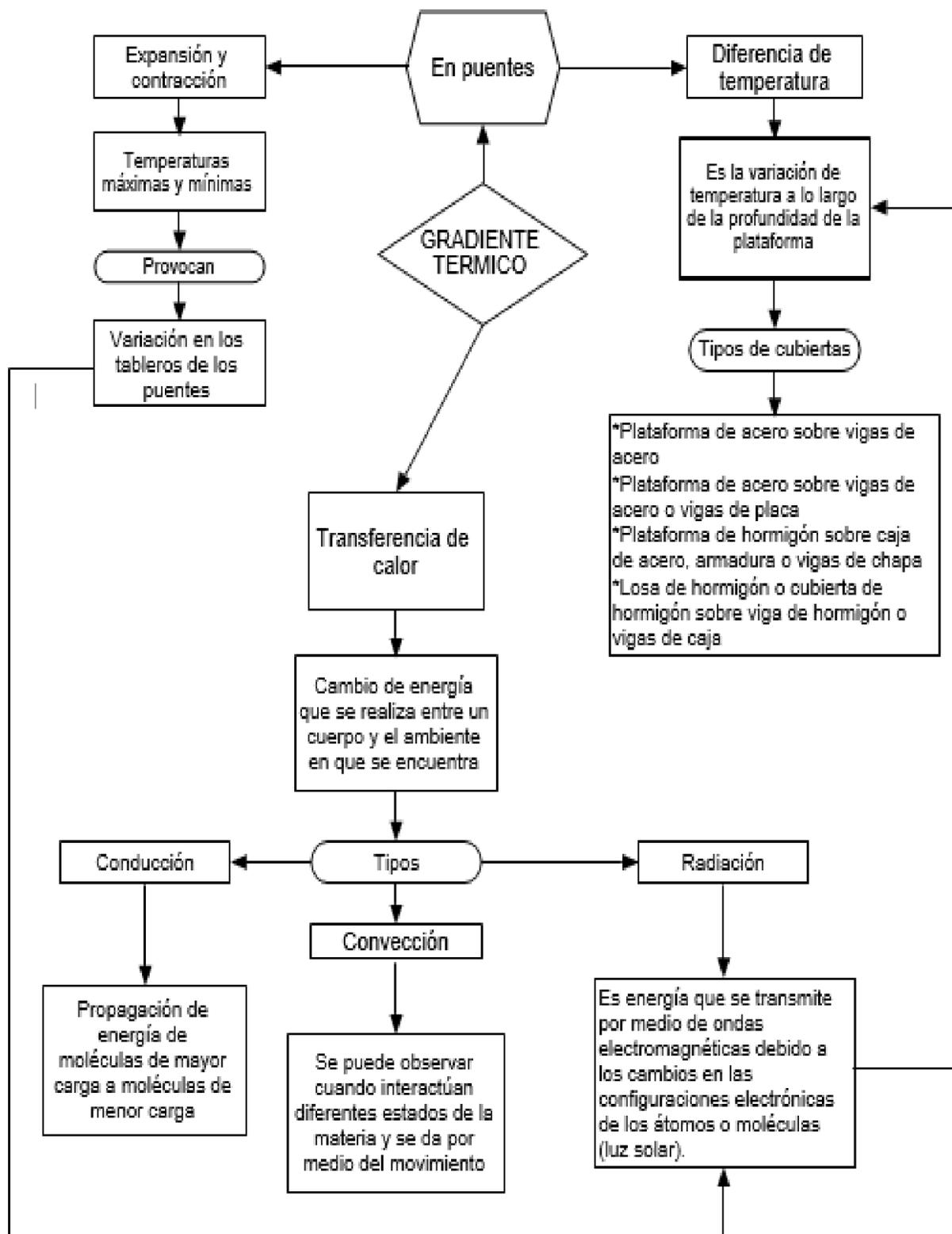


Figura 1 Gradiente térmico. Elaboración propia

4.2. Puente

Un puente vehicular es una estructura la cual nos permite evitar un obstáculo que se encuentre en un tramo de vía y que puede generar grandes cambios en cuanto a reducción de tiempos, economía, desarrollo, movilidad entre otros, es por eso que su diseño debe cumplir con todos los requisitos necesarios para evitar daños a futuro. Una definición más acertada de puente es aquella construcción que nos es de utilidad para conectar diferentes puntos o lugares que de otra manera sería difícil acceder, también es importante resaltar que a lo largo del tiempo estos han variado en cuanto a su material, como en su uso (Bembibre, 2009).

Los puentes se pueden clasificar según su estructura

4.2.1. Puentes Fijos

Los puentes fijos se encuentran afianzados directamente sobre las columnas o los pilares, usualmente este tipo de puentes se suelen ver en las autopistas vehiculares.

4.2.1.1. Puentes de Viga

Una característica de esta clase de puente es que la losa se apoya encima de las vigas longitudinales y que de igual manera estas van apoyadas dado que sean puentes que tengan solo un tramo, dado el caso de que el puente se divida en varios tramos se apoyaran sobre los pilares y los estribos, claro está sin que estos sean continuos.

4.2.1.2. Puentes en Ménsula

Son utilizados generalmente en tramos que son muy amplios. Por lo que reciben el nombre de brazos voladizos (cantiléver) los cuales se planifican desde las pilas. Estos también pueden ser proyectados hacia los bordes para sostener los lados de dos partes suspendidas. También se pueden combinar de diferentes maneras como las utilizadas en el puente Forth.

En los puentes que utilizan una armadura de acero y tableo superior se les puede aplicar el principio de puente cantiléver. En diferentes partes del mundo podemos encontrar diferentes estructuras como viaductos en hormigón armado, vigas armadas en metal que utilizan el método cantiléver; en algunas podemos encontrar métodos en los que se combina el cantiléver con el arco el cual se conoce como arco cantiléver. (AASHTO, 2014, pág. 46)

4.2.1.3. Puentes de Arco

Un puente de arco se caracteriza por sus apoyos los cuales están ubicados en sus extremos de la luz y entre dichos extremos se ubica su estructura con su forma característica de arco a donde se transmiten las cargas. Dependiendo de la ubicación del tablero en la estructura principal estos se pueden clasificar de distintas maneras. En la figura 2 nos presenta un puente de arco de hormigón armado con tímpano macizo.

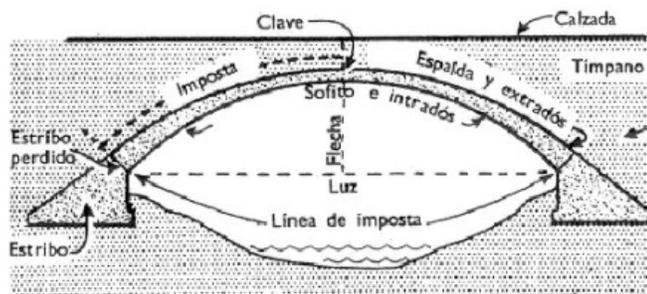


Figura 2 Puente Arco, Tomada de: Introducción al diseño de puente

4.2.1.4. Puentes de armaduras

Son una combinación entre estribos y planchas de los puentes con los estribos y vigas de los de viga; al utilizar esta combinación se forman unidades simples sin acoplamiento de fusión entre las piezas. Se fabrican de hormigón pretensado o armado o de estructuras en acero envueltas de hormigón. Son de procedencia reciente, pero resultan muy provechosas para distanciar los cruces de las vías y líneas férreas. (AASTHO, 2014, pág. 44)

4.2.1.5. Puentes sustentados por cables

Este tipo de puente está por un arco de manera invertida el cual está formado por abundantes cables de acero, de los cuales se sostiene el tablero de la estructura por medio de tirantes verticales. Desde tiempos históricos el ser humano ha hecho uso de esta clase de puentes para evitar obstáculos. Con el pasar de los años, ha sido un resultado de la introducción y la constante mejora de los materiales de levantamientos estructurales, esta clase de puentes son aptos para tolerar los diferentes tipos de tráfico, incluso líneas férreas ligeras.

4.2.1.6. Puentes colgantes

El elemento primordial de este tipo de puentes son sus cables, sostenidos de las torres y fijos en sus extremos a las columnas de sujeción. Estos cables se componen normalmente por

miles de cuerdas de acero galvanizado que va paralelas, de 5 mm de diámetro (normalmente), aglomerados para conformar una sección radial, tienen un aspecto en forma de espiral que conserva su diseño circular y al mismo tiempo que los impermeabiliza. (AASTHO, 2014, pág. 48). En la figura 3 podemos observar la estructura de un puente colgante.

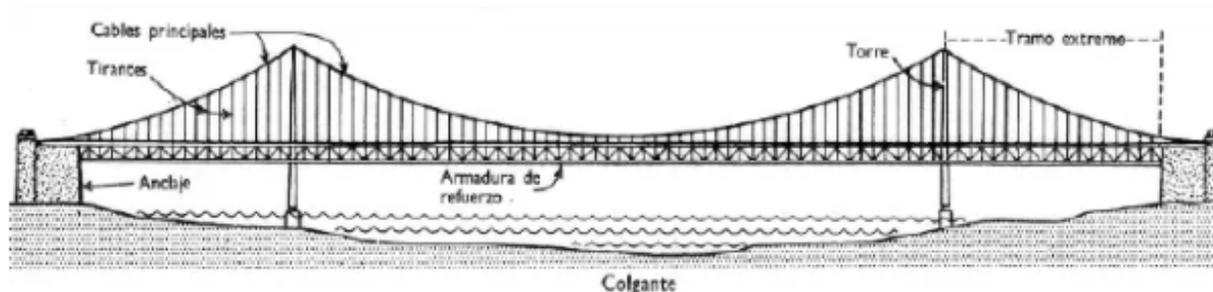


Figura 3 Puente Colgante Tomado de: *Diseño de Puentes*

4.2.1.7. Puentes Atirantados

Están compuestos por cables arriostrados (atirantados) y armaduras de refuerzo capaces de sujetar la flexión generada por las enormes cargas que traspasan el puente. Los tirantes son los componentes esenciales que resisten la estructura del puente atirantado, y para tensar el tablero se utilizan los cables rectos, aportando en los intermedios una secuencia de apoyos más o menos tensos. (AASTHO, 2014, pág. 51)

4.2.1.8. Puentes de pontones

Son puentes flotantes que se sostienen sobre flotadores y por eso no se ven fijos en la tierra como comúnmente se suelen ver otras estructuras. Con el fin de reducir su movilidad se utilizan flotadores de tamaños considerables y esto conlleva a minimizar el movimiento de tal manera que incluso puede ser menor a la de un puente fijo, pero no deja de ser un elemento flotante que está a la deriva del agua. (AASTHO, 2014, pág. 56)

4.2.2. Puentes Móviles

Los puentes móviles se diseñan con el fin de brindar paso a los diferentes tipos de embarcaciones que necesiten alcanzar un determinado lugar y este interfiera en su camino.

4.2.2.1. Basculantes

Estos puentes están rotando en torno del eje horizontal que está ubicado en una línea de apoyos; se incorporan los levadizos y basculantes dependiendo la organización de Gauthey.

Datan como los más antiguos de los móviles y los que en la actualidad son más usados. Son los primeros ya que estos puentes levadizos son utilizados desde los tiempos medievales.

4.2.2.2. Giratorios

Son puentes de eje vertical que ocupan el mismo espacio que los basculantes, al igual tiene dos opciones de apertura: o bien rotar dos vanos semejantes encima de una pila ubicada en la mitad del cauce de navegación, en ciertos casos puede estar ubicada en un borde; o bien rotar un par de semivanos equivalentes, arriba de dos pilas colocadas en las orillas del canal.

(AASTHO, 2014, pág. 59). La figura 4 nos presenta el eje sobre el cual realiza el desplazamiento el puente.

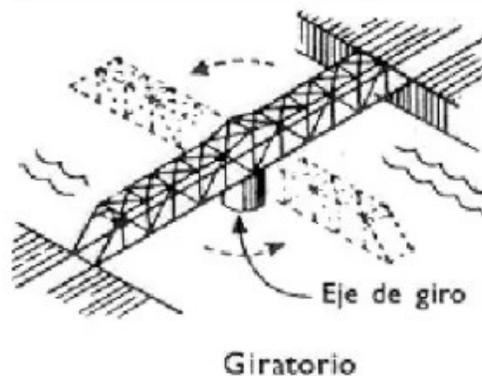


Figura 4 Puente Giratorio Tomado de: Diseño de Puentes

4.2.2.3. Deslizantes

En la actualidad gran parte de los puentes de desplazamiento horizontal son de carácter flotante, sin embargo, los primeros puentes de madera móviles eran construidos constantemente así, dado que el desplazamiento se facilitaba; la estructura se trasladaba longitudinalmente encima de los rodillos, adelantando o regresando el voladizo libre hasta alcanzar al apoyo en el otro borde.

4.2.2.4. Elevación vertical

Estos se caracterizan porque sus tableros están sencillamente apoyados, y estos a su vez se pueden desplazar verticalmente hasta llegar a la cota requerida para la navegación. (Lopez, pág. 14)

4.2.3. Según El Material Del Que Son Hechos

Otra característica con la que podemos clasificar los puentes es el tipo de material con el que están contruidos.

4.2.3.1. Puentes de mampostería de piedra en arco

El sometimiento tecnológico del arco ha permitido fabricar puentes de piedra. El hombre ha trabajado con materias primas como la madera y la piedra sin generar procesos de transformación alguna, exceptuando su deformación. Materiales como el ladrillo, hormigón entre otros se han incorporado como materias transformadas para la construcción de este tipo de estructuras.

4.2.3.2. Puentes de madera

Los puentes se originaron con la necesidad de unir dos orillas de un cauce con uno o más troncos. La madera es un elemento que el hombre a empleado desde sus primeras creaciones ingenieriles, un trozo de árbol sobre un cauce fiablemente fue el primer puente artificial.

En la figura 5 podemos ver un puente construido en madera sobre el rio Kwait.



Figura 5 Puente de Madera. Tomado de: Diseño de Puentes

4.2.3.3. Puentes de hormigón armado

Es una combinación que se hace entre el hormigón y el acero, ajustado exclusivamente para soportar esfuerzos de flexión. El acero es idóneo para soportar tracciones y el hormigón para resistir compresiones. Es por esto que el acero es introducido en el segmento del hormigón,

en el lado que debe soportar las tracciones, y debido a la unión entre estos dos materiales, el primero soporta las tracciones y el otro las compresiones.

4.2.3.4. Puentes de hormigón pre-esforzado

Existen diferencias que permiten conceptualizar el hormigón pretensado como un nuevo material, tales como su armadura pasiva. Ello, hace referencia a un mecanismo que, cuando las acciones exteriores entran en contacto entra en carga sobre la estructura; o por el contrario en el pretensado previamente se tensa ante las posibles cargas que recibirá la estructura como carga muerta, peso propio y cargas vivas, presando el hormigón, de modo que jamás presente tracciones o que ellas tengan un valor mínimo. (Lopez, pág. 15). En la figura 6 podemos apreciar el diseño de un puente con vigas de hormigón pretensado.

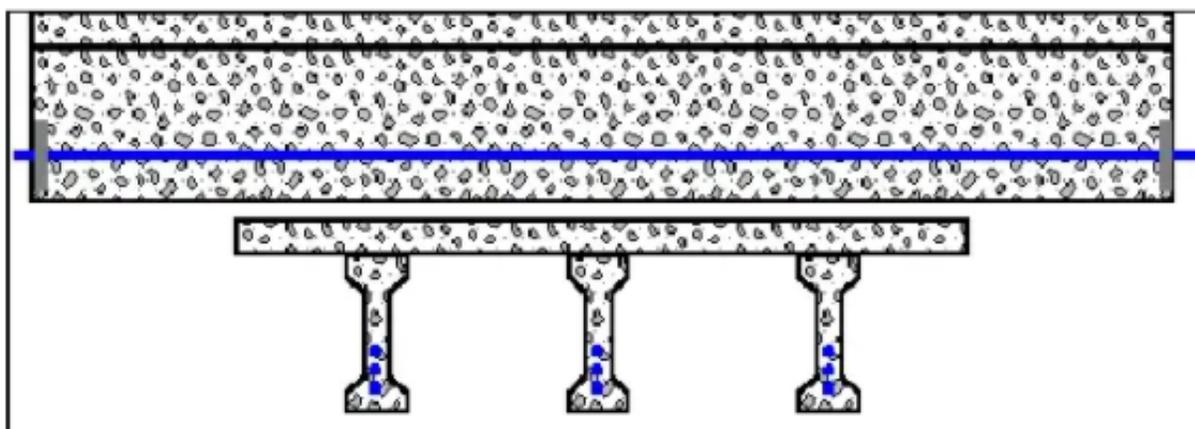


Figura 6 Puente en Hormigón Pre-esforzado. Tomado de: *Introducción al Diseño de Puentes*

4.2.4. Puentes Metálicos

Los puentes construidos sobre vigas metálicas pueden alcanzar distancias hasta de 45 m, por otra parte, se han implementado puentes que logran alcanzar hasta los 80 m como lo son los metálicos en celosías, y los metálicos en forma de arco que construidos en su totalidad alcanzan los 100 m, siendo distancias considerables. Son construcciones adaptables, sus planteamientos permiten cubrir distancias considerables, son rápidos de construir, pero a la vez costosos, aunque también están expuestos a los agentes corrosivos, los gases atmosféricos, las emisiones que generan las fábricas y ciudades, lo que acarrearán mantenimientos costosos. Entre los más relevantes encontramos los puentes de fundición, puentes de acero y puentes de hierro. (AASTHO, 2014, pág. 69)

4.3. Temperatura

Podemos entender por temperatura que se origina a partir de los cambios en las propiedades de un objeto que está caliente o frío las cuales podemos notar al tacto. Un determinado objeto o masa que se someta a una temperatura mayor al tocarlo se puede notar el cambio de temperatura del cuerpo al tocar otro objeto con características similares que esté en un estado frío. A pesar de esto, existen demasiadas propiedades que están ligadas a la temperatura para poderlas medir. Existen varios elementos que son buenos conductores de calor como los metales los cuales si los sometemos a temperaturas elevadas en un punto específico el calor se seguirá transmitiendo al resto del elemento hasta llegar a un punto de equilibrio en el que todo el objeto está a la misma temperatura, o como cuando se conduce corriente eléctrica por un alambre, la variación que este pueda presentar depende de las diferentes cargas a las que se someta (Young, Freedman, 2009, pág. 571).

4.4. Calor

Es un cambio o transferencia de variaciones energéticas que se realiza entre un cuerpo y el ambiente en el que se encuentra y se debe a que no todos los cuerpos se encuentran a una misma temperatura. Pero todo tiene un límite ya que cuando el calor alcanza un máximo se deja de considerar como calor, y pasa a ser energía térmica y por lo cual no interfiere con la cinética o potencial del sistema de un cuerpo (Hoyos y Mejia, pág. 51).

En la tabla 1 se presenta los materiales con su respectivo calor específico.

Tabla 1 Calores Especificados para Materiales. Tomada de: Termodinámica de los Sistemas Aeronáuticos

Calores específicos Kcal/kg °C (National Boreau Standars)					
Temperatura en °C	-23	25	127	227	327
Aluminio	0,206	0,216	0,227	0,238	0,249
Hierro	0,101	0,107	0,116	0,127	0,139
Plata	0,0556	0,0565	0,0568	0,0579	0,0594
Cromo	0,102	0,107	0,120	0,128	0,135
Cobre	0,0900	0,0921	0,0946	0,0969	0,0993
Mercurio	0,0338	0,0333	0,0327	0,0324	0,0324

4.5. Transferencia de Calor

La transmisión de calor es una transición que se da entre dos elementos desde uno que tiene la temperatura más elevada hacia otro que está con coeficiente de calor más bajo y este fenómeno se detiene cuando las dos partes llegan a un punto de equilibrio es decir ambos obtienen la misma relación de calor. También podemos afirmar que la termodinámica es un tipo de carga energética que se puede manifestar de diferentes maneras. El interés de este texto es analizar cómo se transmite una carga térmica de un cuerpo a otro cuando existen diferencias de temperatura (Çengel, Ghajar, 2011, pág. 2).

4.5.1. Conducción

Esta se da por la propagación de moléculas con una mayor carga energética hacia otro objeto con una menor carga lo cual genera una correlación entre las sustancias que se ven involucradas. Estas de cambios se pueden manifestar o generar en los diferentes estados de la materia como lo son los sólidos, líquidos o gases (Çengel, Ghajar, 2011, pág. 17).

Un ejemplo de cómo podemos observar esta manifestación de cambio de la sensación térmica es con una varilla metálica a la cual si se le coloca una llama en una de sus puntas y la estamos sosteniendo del otro lado notamos como cada vez se va calentando aún más así no esté cerca de la llama, esto se genera debido a la conducción que se da por medio del material. Si lo analizamos como si fueran partículas muy diminutas las que están más cerca de las llamas aumentarían su temperatura lo cual hace que su energía cinética también aumente y le transfieran esa energía a las partículas que estén más cerca y así hasta llegar al total de la varilla (Young, Freedman, 2009, pág. 592).

Podemos concluir que esto se da debido a la manifestación del calor que se presenta proporcionalmente y que dependiendo de la variación en el área de la misma se da la transmisión de calor, y depende del grosor de la capa, ya que es recíprocamente proporcional (Çengel, Ghajar, 2011, pág. 18).

$$Q_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Q_{cond} = Razón de conducción de calor

k = Conductividad térmica

$A = \text{Área}$

$T = \text{Temperatura}$

$\Delta x = \text{Espesor}$

$$\text{Razón de conducción del calor } \alpha = \frac{(\text{Área})(\text{Diferencia de temperatura})}{\text{Espesor}}$$

Si se llegara a presentar un caso límite de $\Delta x \rightarrow 0$, la anterior ecuación se puede simplificar de la siguiente manera:

$$Q_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx}$$

La figura 7 nos muestra cómo se da la propagación de calor en una barra metálica mediante de la conducción.

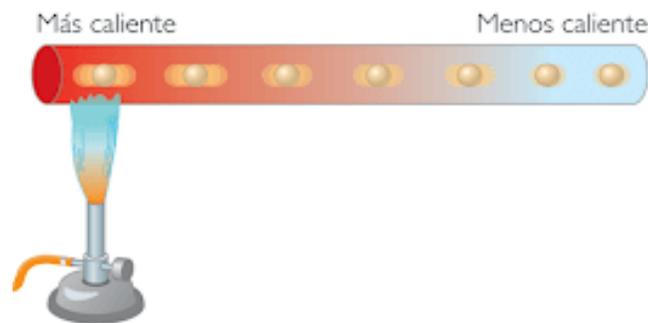


Figura 7 Conducción. Tomada de Física Sarmiento

4.5.2. Convección

Es una manifestación que la podemos observar entre dos estados de la materia por ejemplo de un área sólida y un líquido o un gas que estén en movimiento es la manera de transmisión de energía entre un área sólida y el líquido o gas próximos que se encuentran desplazándose a menudo y se conocen los resultados de las mezclas de la conducción y la circulación de fluidos. Cuando mayor es la velocidad de los movimientos de los fluidos, mayor es el traspaso de calor, ya que es directamente proporcional. Pero qué pasa si no hay un movimiento rápido y constante del fluido, no se produce una transferencia por convección sino por conducción pura. Aunque la convección es una manifestación muy compleja una manera

sencilla de analizarlo es que esta se presenta proporcional a la desigualdad de temperatura y se expresa en forma conveniente por lo manifestado en la **ley de Newton del enfriamiento** (Çengel, Ghajar, 2011, págs. 25, 26).

$$Q_{conv} = hAs(Ts - T_{\infty})$$

Q_{conv} : Transferencia de calor por conveccion

h : Coeficiente de calor por conveccion

As : Área superficial

Ts = Temperatura de la superficie

T_{∞} : Temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie.

La figura 8 nos muestra cómo se presenta el intercambio de calor en un entorno natural.



Figura 8 Convección. Tomada de: *Calor y Temperatura*

4.5.3. Radiación

Es la energía que emana la materia en modo de ondulaciones electromagnéticas producto de los cambios generados en las distribuciones electrónicas de las partículas o moléculas. A diferencia de lo que sucede con la conducción y la convección, donde este proceso se da por la radiación, ya que necesita de un contacto directo con el elemento a transferir. También es la más ligera a comparación de las dos anteriores, dado que se da igual a la velocidad de la luz y no sufre mitigación en un vacío. Así es como recibimos la luz solar en la Tierra (Çengel, Ghajar, 2011, pág. 27).

La razón máxima de la radiación que se puede generar desde un área a una temperatura termodinámica T_s (en K o R) es manifestada en la ley de Stefan-Boltzmann como:

$$Q_{emitida, max} = \sigma A_s T_s^4$$

La radiación producida por la mayoría de las superficies existente es menor que la expulsada por un cuerpo negro a la misma temperatura y se da como:

$$Q_{emitida} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4$$

La causa por la que la radiación es absorbida se puede determinar de la siguiente manera:

$$Q_{absorvida} = \alpha Q_{incidente}$$

$$\alpha = 1$$

En la figura 9 se observa como energía generada por la radiación es absorbida por la placa.

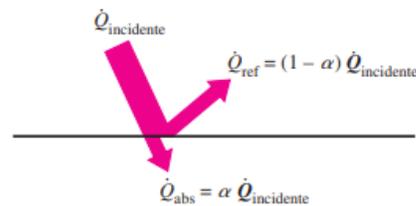


Figura 9 Radiación Tomada de; Yunus A. Cengel

En el momento en que una zona de emisividad ε y área visible A_s , a una temperatura termodinámica T_s , está totalmente confinada por una superficie mucho mayor (o negra), a una carga termodinámica T_{alred} , y aislada por un gas por ejemplo el aire, en cual no obstaculiza la radiación, la manera de expresar el traslado de calor por radiación entre dos superficies se da por: (Çengel, Ghajar, 2011, págs. 27, 28, 29).

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{alred}^4)$$

Tomando en cuenta lo anterior debemos tener presente como se da la transmisión del calor y como es el proceso del flujo de calor que se produce de un punto a otro y cuál es el medio que utiliza para llegar a este punto (sólido, líquido o gaseoso) y cuál es la reacción que genera en determinadas horas del día en la estructura.

Inicialmente debemos hacer un análisis y evaluación de cómo se encuentra la estructura del puente y conocer el que tipo de temperatura vamos a analizar, puesto que existen varias como lo son conducción, radiación y convección, también analizaremos otros aspectos como la regionalización de las temperaturas, ya que en nuestro país existen variedad de climas debido a la geografía en la que se encuentra ubicado, también debemos hacer una comparación en cuanto a la teoría y la práctica de los resultados obtenidos en nuestra investigación y determinar el comportamiento que se presenta con los diferentes cambios de temperatura y como pueden influir en un futuro en las nuevas investigaciones y desarrollo de este tipo de proyectos.

También es importante tener conocimiento sobre la estructura para saber los puntos a analizar en las tomas de temperatura para que al final podamos dar conclusiones acertadas y verídicas de cómo ha sido su comportamiento a lo largo de la investigación.

4.6. Dilatación

El calor produce gran diversidad de cambios y modificaciones en la materia, la dilatación es uno de los resultados que puede presentar. Varios elementos pueden presentar una dilatación cuando se produce cambios en su temperatura independientemente de que sean altas o bajas lo que genera que se contraigan o se expandan. Con el fin de evitar algunos daños o agrietamientos en sectores como la construcción civil se ha optado por la implementación de juntas de dilatación las cuales desempeñan una labor primordial como lo es admitir que el material pueda desplazarse cuando se presentan altas variaciones en la temperatura.

4.6.1. Dilatación Lineal

Si se desea estudiar la dilatación en un solo sentido se puede realizar por medio de la dilatación lineal, se toma una medida inicial del elemento al cual se le resta la medida final luego de que se haya expuesto a un aumento significativo de temperatura y tendremos como resultado la variación dimensional. (Moron, 2015, pág. 11)

$$Lf = L_o [1 + \alpha_l (T_f - T_o)]$$

Donde:

α_l : Coeficiente de dilatación lineal

L_0 : Longitud inicial

L_f : Longitud final

T_0 : Temperatura inicial en °C

T_f : Temperatura final en °C

La figura 10 nos presenta el resultado final de un objeto que está sometido a un elevado cambio de temperatura.

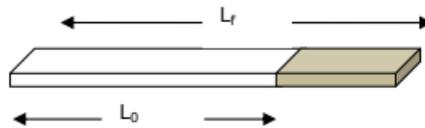


Figura 10 Dilatación Lineal. Termodinámica sistemas aeronáuticos.

4.6.2. Dilatación Superficial

Es la variación que se produce en el área de la losa que se somete a cambios en la temperatura. La figura 11, nos muestra una placa rectangular que está sometida a una temperatura T_0 la cual se aumenta hasta una temperatura $T_f > T_0$. Se puede representar de la siguiente manera:

$$S_f = S_0 [1 + \beta L (T_f - T_0)]$$

Donde:

βL = coeficiente de dilatación superficial

S_0 = Longitud inicial

S_f = Longitud final

T_0 = Temperatura inicial

T_f = Temperatura final.

La figura 11 nos presenta el cambio que se da en una placa cuando se somete a una alta temperatura.

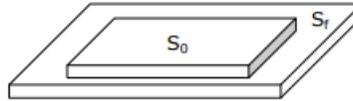


Figura 11 Dilatación Superficial. Termodinámica sistemas aeronáuticos.

4.6.3. Dilatación Volumétrica

Se considera como una variación o cambio en el volumen de un sólido en las tres diferentes dimensiones tanto en ancho, largo y alto. (Moron, 2015, pág. 12). (Véase en la figura 12).

$$V_f = V_0 [1 + \gamma_L (T_f - T_0)]$$

Donde:

γ_L = coeficiente de dilatación volumétrica

V_0 = Longitud inicial

V_f = Longitud final

T_0 = Temperatura inicial

T_f = Temperatura final.

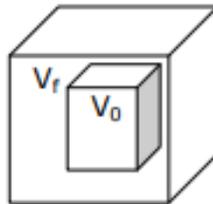


Figura 12 Dilatación Superficial. Termodinámica sistemas aeronáuticos.

5. Estado Del Conocimiento

Para dar inicio a nuestra investigación hemos tomado como punto de partida la plataforma de búsqueda de Scopus, la cual nos brindó una gran variedad de artículos relacionados con el proyecto, a la cual se ingresaron palabras clave como lo fueron temperature, concrete, bridge, y que arrojó una gran variedad de artículos los cuales fueron usados como base para la

elaboración del proyecto, también se hizo una depuración por años donde solo se colocaron los resultados desde el año 2000, con la intención de obtener los últimos avances que hay sobre este tema, también se hizo una depuración de los artículos encontrados por medio del título con el fin de elegir los que más tengan relación con el tema en estudio y que pudieran aportar diferentes puntos de vista los cuales sirvieron como guía para la elaboración del proyecto, de igual manera se revisaron algunos resumen para obtener información relevante y que aportaran datos importantes a la búsqueda, en las siguientes ilustraciones se analizaron los resultados las estadísticas que dio la búsqueda en: (*Scopus - Document search*, n.d.)

En la figura 13 se muestra cuál fue el promedio de publicaciones realizadas por año durante los últimos 20 años relacionadas con el tema y cabe resaltar que en el año 2019 fue un año con un gran auge, ya que se hicieron 50 publicaciones.

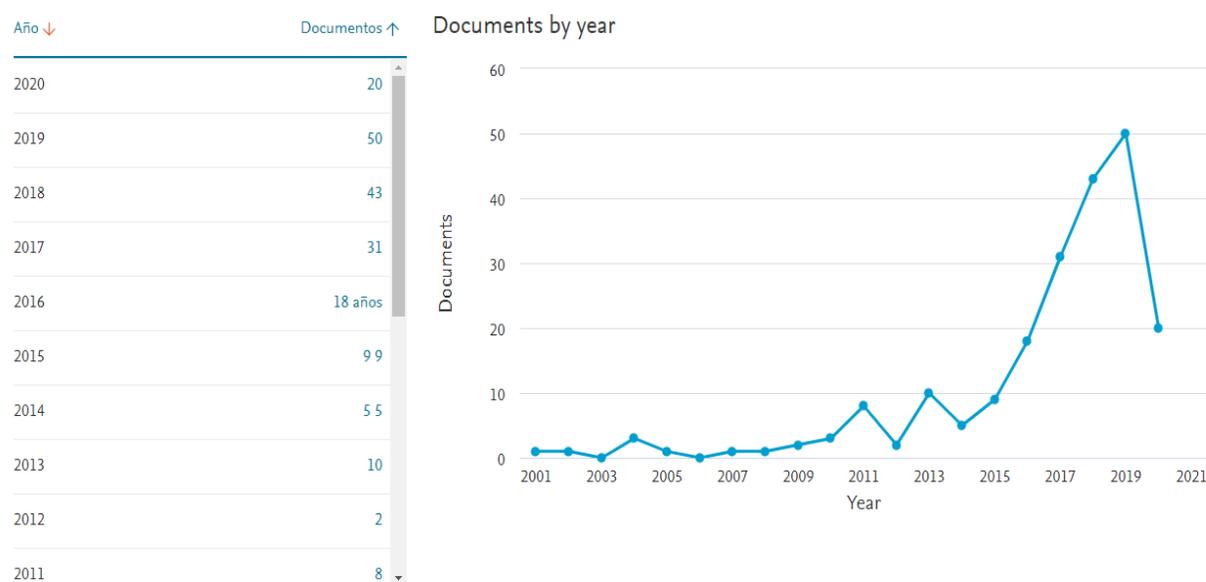


Figura 13 Documentos por año. Obtenida de: *Scopus - Document search*, n.d

Como lo muestra la figura 14 algunos de los autores que más resaltan en investigaciones sobre el tema están Bruhwiler, Deng, Moravcik, Qian, quienes han profundizado un poco más sobre este tipo de análisis.

Documents by author

Compare the document counts for up to 15 authors.

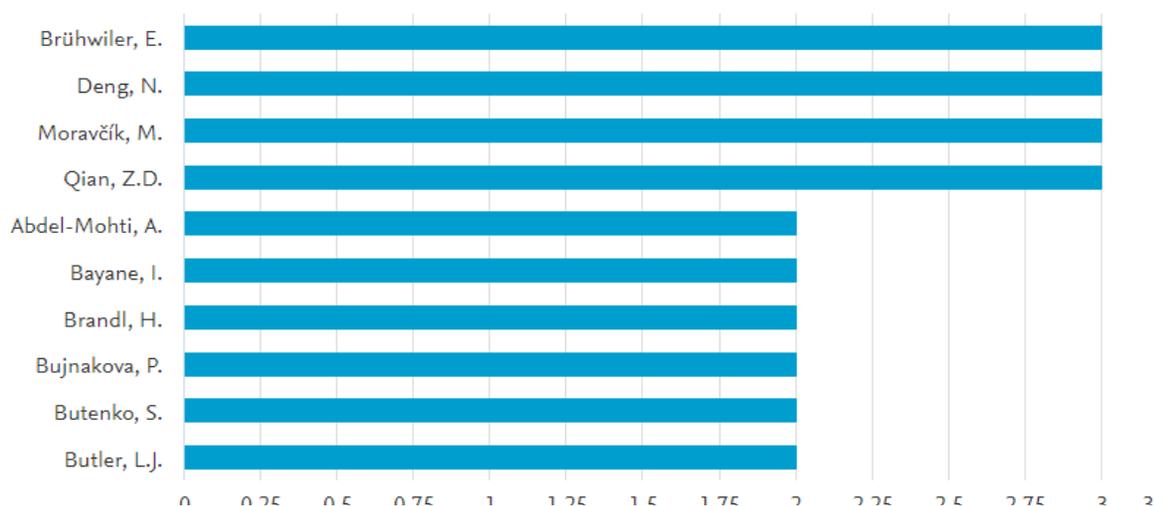


Figura 14 Documentos por autor. Obtenida de: Scopus - Document search, n.d

En la figura 15 se presenta la publicación de artículos por país siendo China quien esta a la cabeza con más publicaciones.

Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.

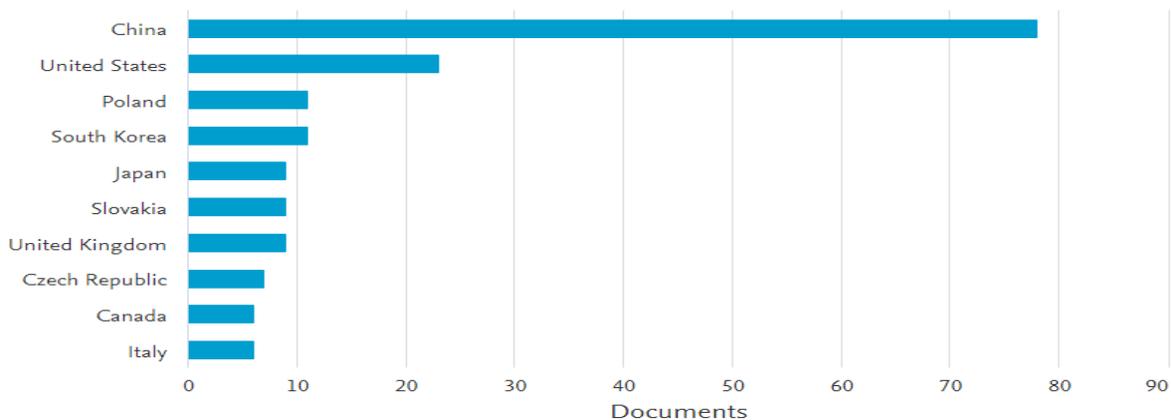


Figura 15 Documentos por país. Obtenida de: Scopus - Document search, n.d

También en la búsqueda se encontraron algunos artículos relacionados con la investigación, y que dieron una idea de cómo se pueden analizar los resultados, por ejemplo en un artículo publicado en el 2019 habla sobre el pavimento de la cubierta de un puente de asfalto puede ser sometido a ambientes de alta y baja temperatura, se daña fácilmente debido a la congelación y verano; con el fin de evitar problemas o daños debido a la congelación y el surco del pavimento asfáltico, se debe implementar estrategias de que controlen la temperatura y la circulación del agua que permita controlar la temperatura de la cubierta, para ello se debe tener en cuenta factores tales como el espaciado de la tubería, las velocidades y las temperaturas de agua (Dan, Tan y Chen, 2019).

En el artículo habla sobre las grietas que se forman en los puentes de asfalto mediante los factores de temperatura y su principal problema que se divide en diferentes partes: determinar la temperatura en el campo del pavimento; determinación del estado de tensión-deformación causado por el cambio de temperatura mediante la creación de un modelo de diseño de ingeniería; determinar las características reológicas del hormigón asfáltico (Grishyn, Ivanov y Kayumov, 2020).

Por otra parte en un estudio realizado desde mayo de 2019 y mayo de 2020 en un puente de viga cajón en concreto pretensado al cual se le instalaron diferentes equipos especiales para medir los diferentes factores a los que está expuesto un puente en el medio ambiente como la radiación solar, la tensión, velocidad del viento, entre otros, y con los datos obtenidos durante el periodo mencionado fueron usados para analizar la distribución de la temperatura generados por la radiación solar, para ello realizaron el estudio de los datos de radiación solar por medio de un modelo de predicción de gradiente térmico de temperatura lateral, una vez obtenidos los datos de la modelación y la condición de límite de radiación solar los cuales se obtuvieron del monitoreo se realizaron los respectivos cálculos para hallar las tensiones de tracción tanto en el sentido transversal como longitudinal. Como resultado obtenido de este estudio se pudo demostrar que el gradiente térmico genera un importante esfuerzo de tracción por lo tanto no se debe omitir durante el diseño estructural (Lei, X. , Fan, X. , Jiang, H. , Zhu, K. , Zhan, H., 2020).

En un estudio realizado por (Gu, B. , Zhou, FY , Gao, W. , Xie, FZ , Lei, LH, 2020), sobre los cambios de la temperatura en un puente de viga de caja en dos secciones transversales de la viga de los cuales se hizo el análisis de los datos obtenidos y se pudo determinar a partir de

los resultados que la distribución de la temperatura está directamente relacionada con el tamaño de la viga y que longitudinalmente los valores de la temperatura también cambian. En el estudio se usó un modelo de predicción de temperatura bidimensional utilizando los valores obtenidos en la medición y se analizó como el tamaño de la viga afectaba la distribución de la temperatura. Basados en los resultados de los análisis se plantearon y verificaron diferentes modelos simplificados sobre el gradiente de temperatura transversal y vertical los cuales podían examinar los cambios generados a lo largo de la dirección del puente.

Del estudio se puede concluir que después de que se presentaran altas temperaturas fue cuanto se pudieron observar los gradientes de temperatura más críticos y se pudo notar que a lo largo del puente las temperaturas permanecían similares, por otra parte, en el alma y la losa inferior las temperaturas que se presentaron fueron distintas entre sí, alcanzando una temperatura longitudinal de $5,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente pudiéndose notar que en la losa inferior las temperaturas son más bajas.

6. Metodología

En el planteamiento del proyecto se propone realizar la investigación en dos fases las cuales permitirán un desarrollo adecuado de la propuesta, una primera fase en la cual se realizó la toma de datos in situ en los dos puentes escogidos para el proyecto y una segunda fase en la cual se hicieron los respectivos análisis de las fotografías tomadas y el respectivo estudio de los resultados.

6.1. Paso 1

En la primera parte del proyecto se realizó la elección de los puentes para la toma de evidencias y el análisis de datos, el No. 1 puente ubicado sobre la calle 26 en Bogotá (Av. Rojas con calle 26) y el No. 2 puente ubicado en la Rotonda de Siberia – Cota (Vía Bogotá – La Vega Cundinamarca.)

6.1.1. Puente Av. Rojas con calle 26 – Bogotá

Ubicación: Bogotá – Av. Rojas con Calle 26

Coordenadas: 4° 39' 47" N - 74° 06' 34" W

Año de Construcción: 1997

Descripción: Es un puente para tránsito vehicular, con un total de diez (10) luces, con un tablero que de bordillo a bordillo tiene 22.66 m, 7 vigas postensadas, con dos calzadas cada una de tres carriles en los dos sentidos.

La figura 16 muestra la elevación de los pórticos y la distribución de las vigas.

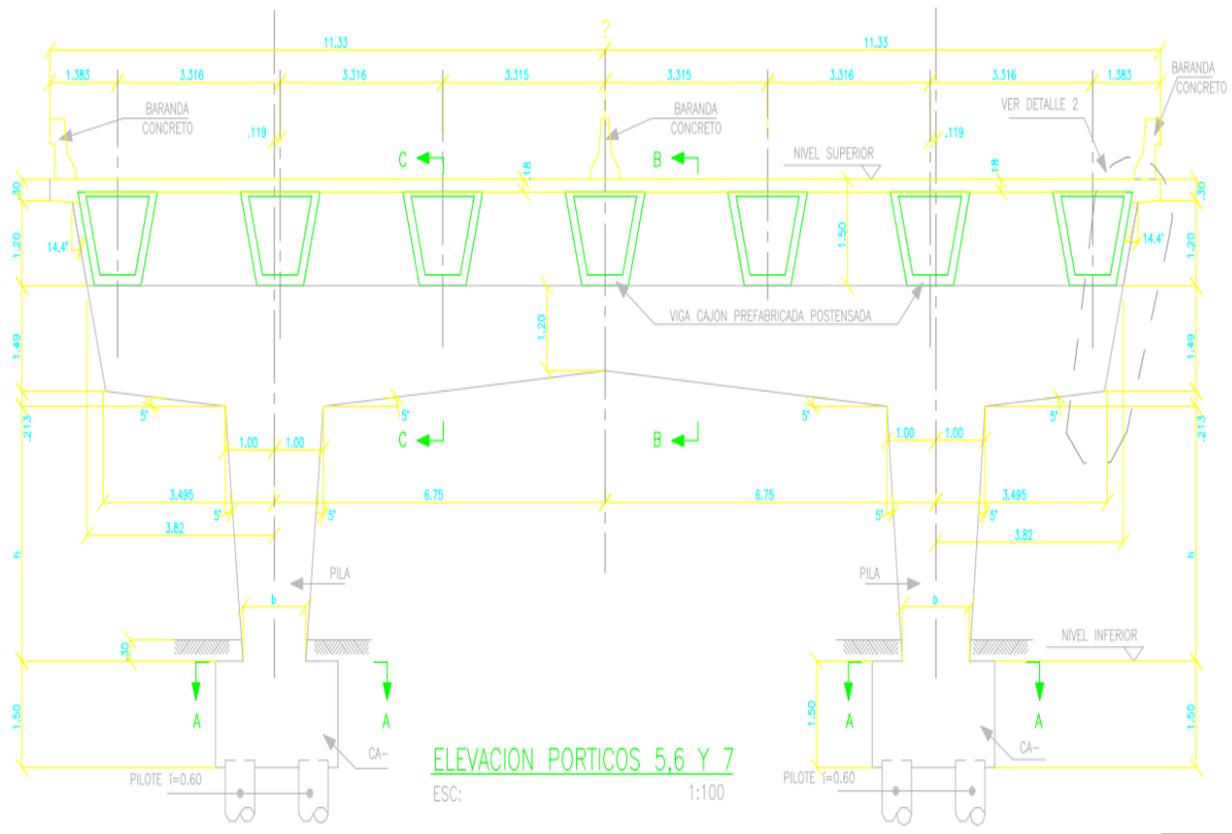


Figura 16 Elevación Pórticos. Tomada de Webidu

6.1.2. Puente Siberia Cota

Ubicación: Rotonda Siberia Vía Bogotá – La Vega

Coordenadas: 4° 45' 31" N - 74° 09' 22" W

Descripción: El puente de Siberia en una estructura diseñada tipo viga cajón aligerada y postensada, sus tableros son independientes para cada uno de los sentidos con dos carriles cada uno, cada uno de los tableros está apoyado sobre dos pilas redondas cada uno y estas cuentan con neoprenos antisísmicos.

La figura 17 presenta una panorámica del puente se Siberia Cota sentido Sur – Norte.



Figura 17 Puente Siberia-Cota Fuente: Fuente Propia

En la figura 18 se puede observar los pilares que están soportando la estructura del puente de Siberia Cota.



Figura 18 Puente Siberia - Cota. Fuente: Fuente Propia

6.2. Paso 2

Para la segunda parte del proyecto de investigación se realizó la toma de datos In situ con la cámara proporcionada por la Universidad Antonio Nariño de referencia FLIR ONE PRO, en trabajo de campo se inició en el puente de la Av. Rojas con calle 26 el día 12 de septiembre y se

terminó el 04 de octubre del 2020, para el segundo puente se dio inicio el día 20 de septiembre y se terminó el 12 de octubre del mismo año, la toma de datos In situ se realizó en dos horarios diferentes cada día, con el fin medir los puntos más altos y bajos de las temperaturas durante el periodo mencionado anteriormente, esta toma de datos se realizó en los horarios de 5:00 am – 6:30 am y 1:00 pm – 2:30 pm.

6.2.1. Puente Av. Rojas con Calle 26

A continuación, se evidencian los diferentes puntos de mejor conveniencia para el respectivo análisis de temperatura capturados con la cámara FLIR ONE PRO, Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22.



Figura 19 Puente Av. Rojas con Calle 26. Fuente Propia

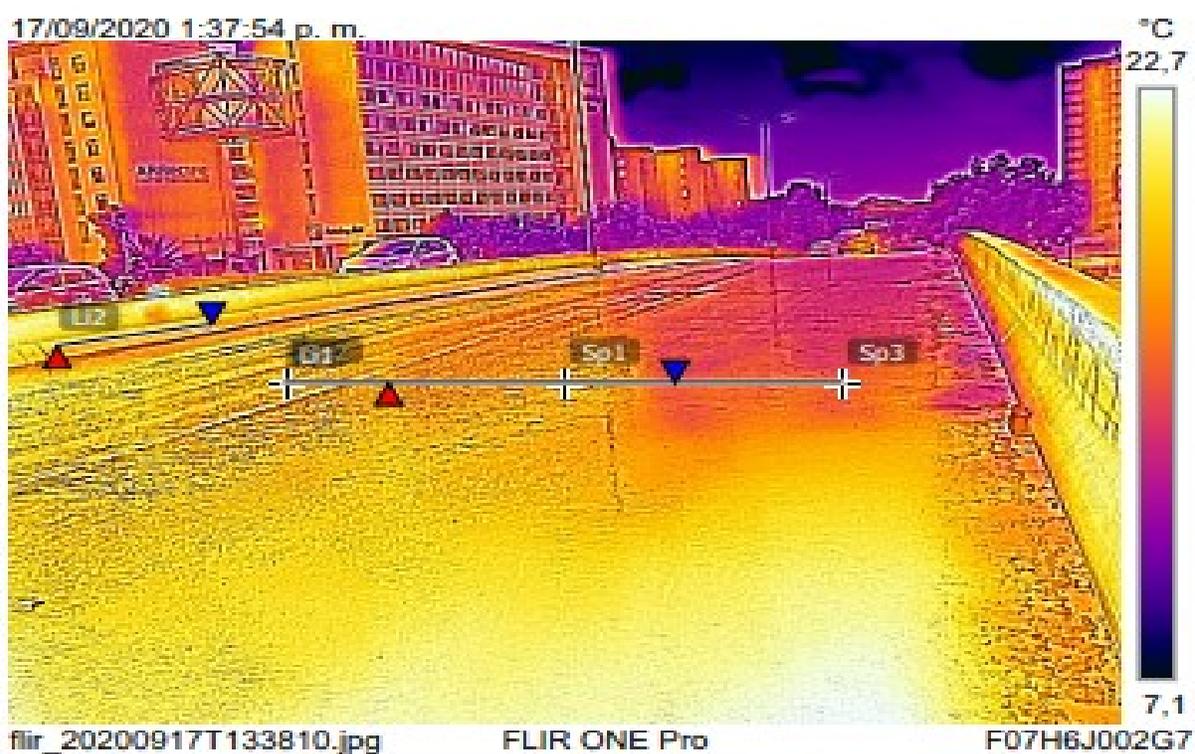


Figura 20 Puente Av. Rojas con Calle 26. Fuente Propia

21/09/2020 6:08:38 a. m.

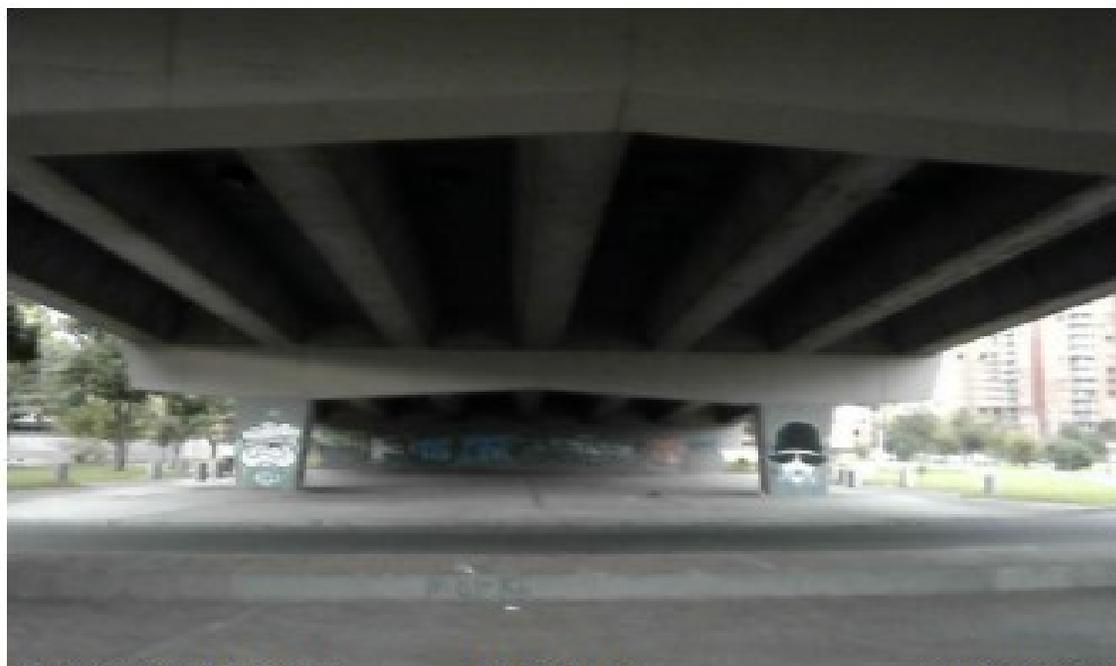


flir_20200921T060911.jpg

FLIR ONE Pro

F07H6J002G7

21/09/2020 6:08:38 a. m.



flir_20200921T060911.jpg

FLIR ONE Pro

F07H6J002G7

Figura 21 Puente Av. Rojas con Calle 26. Fuente Propia



2/10/2020 6:24:03 a. m.



Figura 22 Puente Av. Rojas con Calle 26. Fuente Propia

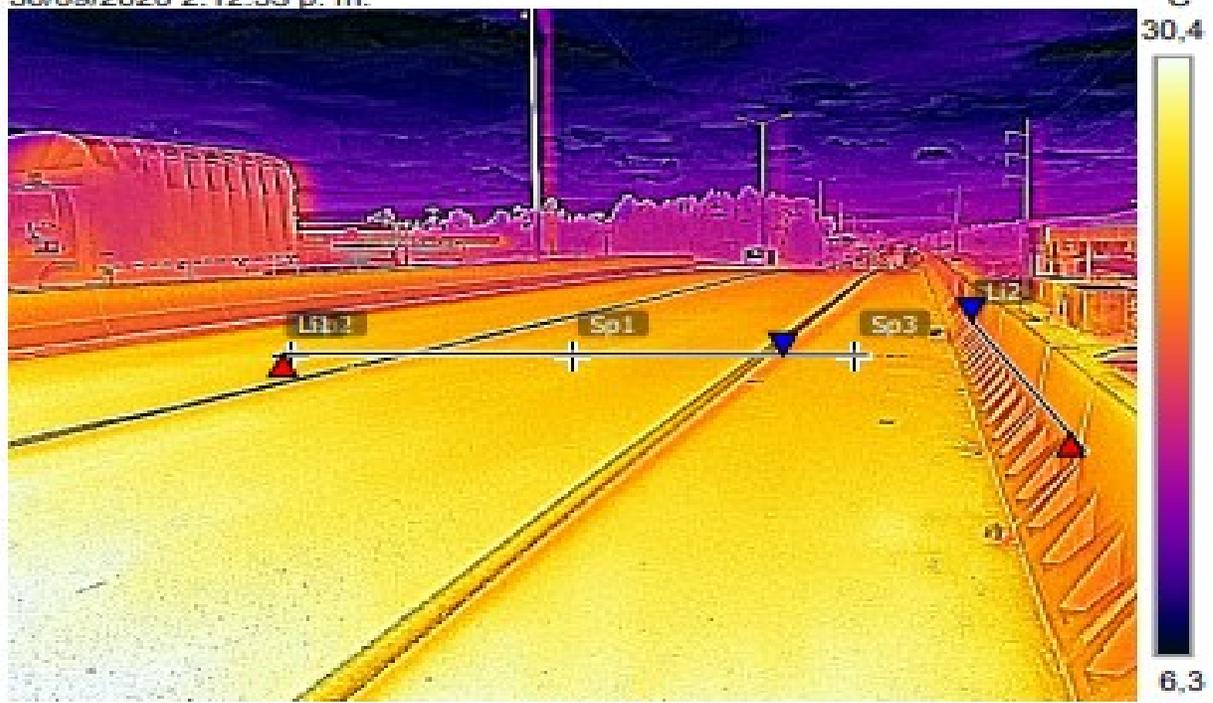
6.2.2. Puente Siberia Cota, Vía Bogotá – La Vega

También se evidencian los diferentes puntos de mejor conveniencia para el respectivo análisis de temperatura capturados con la cámara FLIR ONE PRO, Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26.



Figura 23 Puente Siberia Cota. Fuente Propia

30/09/2020 2:12:53 p. m.



flir_20200930T141303.jpg

FLIR ONE Pro

F07H6J002G7

30/09/2020 2:12:53 p. m.



flir_20200930T141303.jpg

FLIR ONE Pro

F07H6J002G7

Figura 24 Puente Siberia Cota. Fuente Propia

6/10/2020 5:34:46 a. m.

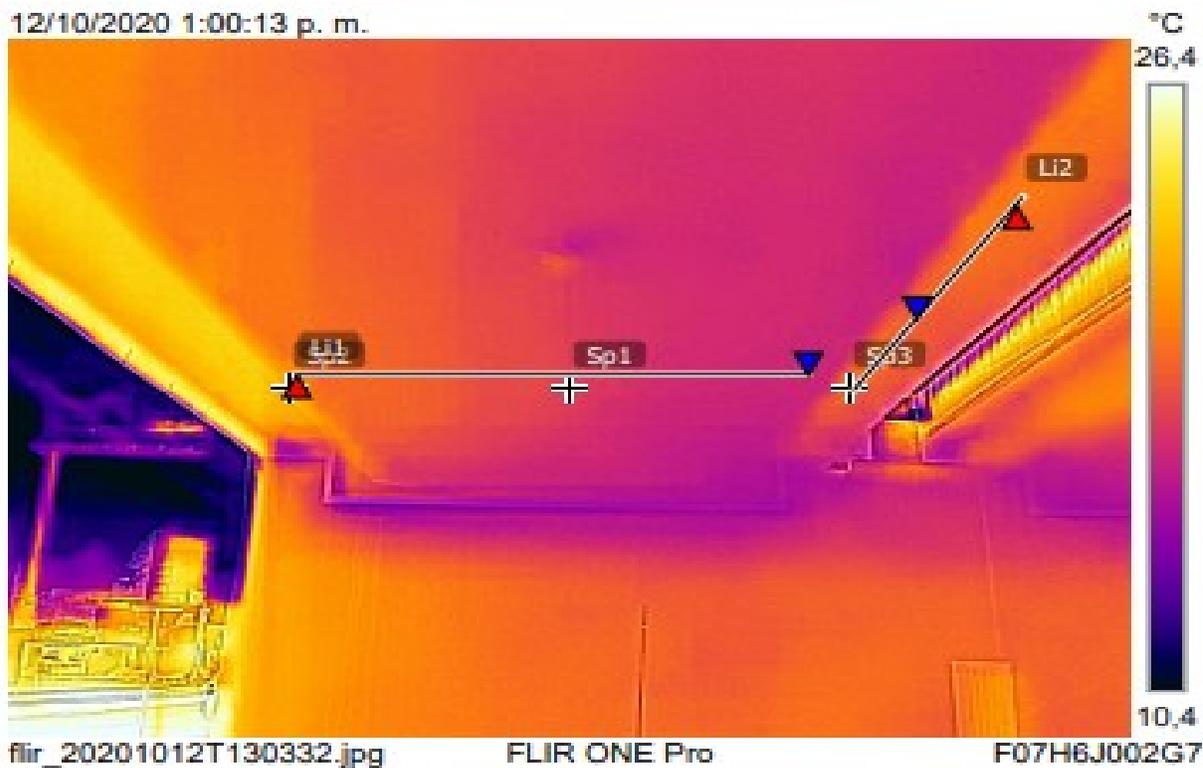


6/10/2020 5:34:46 a. m.



Figura 25 Puente Siberia Cota. Fuente Propia.

12/10/2020 1:00:13 p. m.



12/10/2020 1:00:13 p. m.



Figura 26 Puente Siberia Cota. Fuente Propia.

6.3. Paso 3

Una vez culminado el periodo de la toma de las fotografías en los dos puentes seleccionados, se continuó con la elaboración de los informes uno a uno de los 20 días en que se hizo el registro de datos en el software FLIR TOOLS tanto para el puente de la Av. Rojas con Calle 26, como para el puente de Siberia Cota, realizado este procedimiento se realizó el correspondiente análisis de datos obtenidos, teniendo en cuenta otras variables como la velocidad del viento, la precipitación, la temperatura las cuáles se obtuvieron la estación meteorológica del aeropuerto El Dorado (*Bogotá, Colombia Weather History | Weather Underground, n.d.*) y la radiación solar se obtuvo de (*Tiempo promedio el 26 de septiembre en Aeropuerto El Dorado, Colombia - Weather Spark, n.d.*), en la figura 27, figura 28, figura 29, figura 30, se evidencia lo mencionado anteriormente.

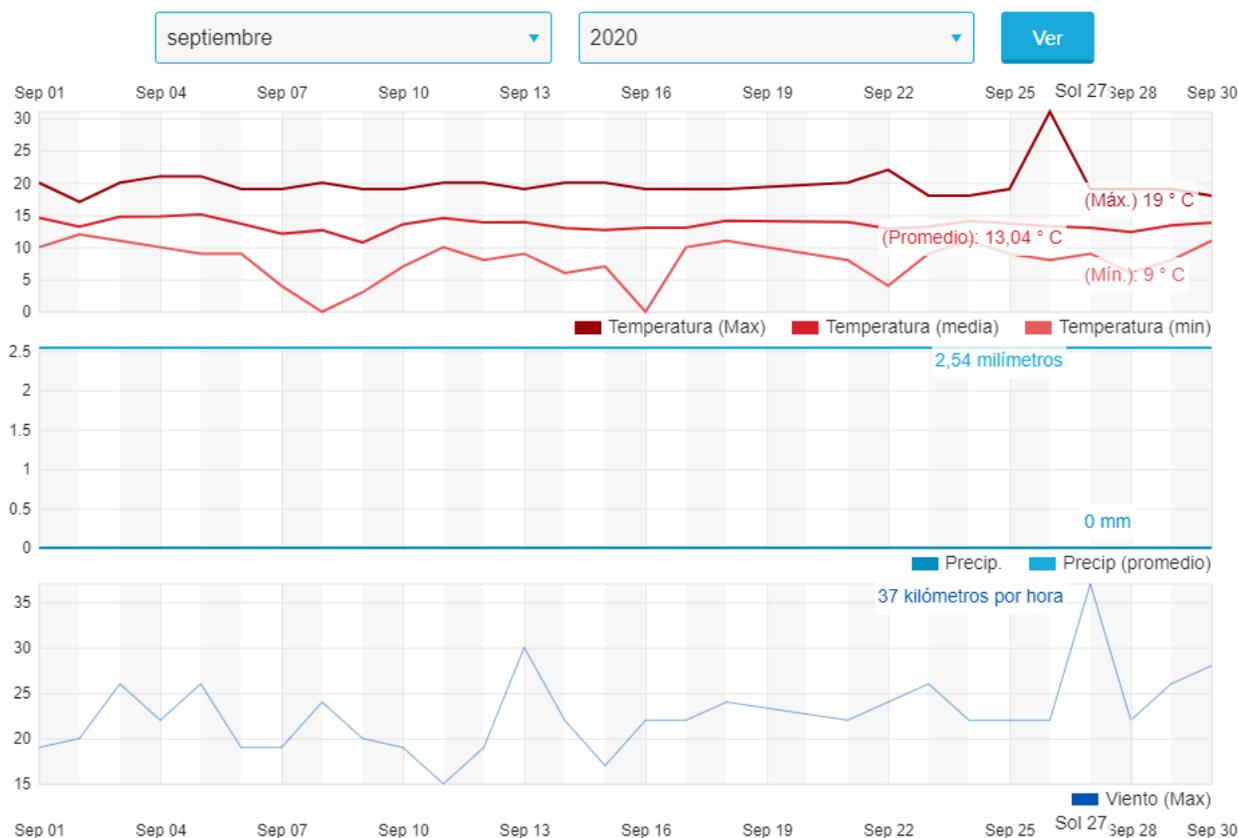


Figura 27 Grafica Meteorológicas de Bogotá, septiembre. tomada de:(Bogotá, Colombia Weather History | Weather Underground, n.d.)

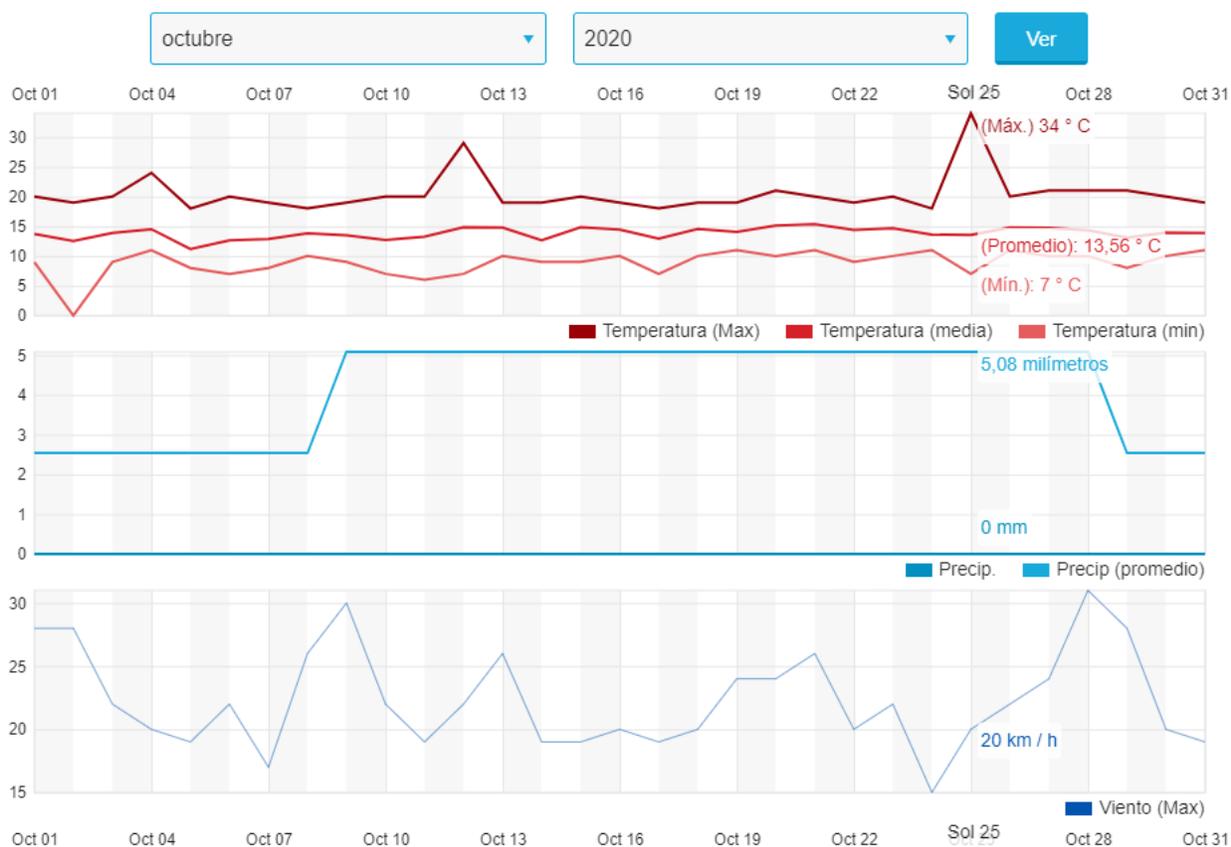


Figura 28 Grafica Meteorológicas de Bogotá, octubre. tomada de:(Bogotá, Colombia Weather History | Weather Underground, n.d.)

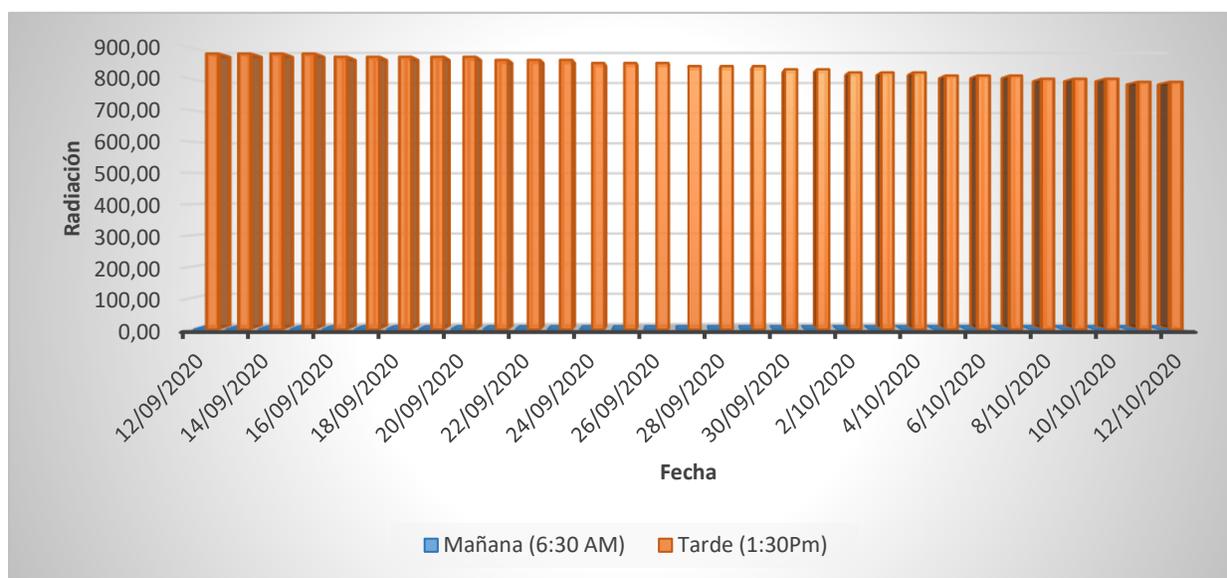


Figura 29 Grafica Radiacion Solar Bogotá. Elaboración Propia. Datos obtenidos de: (Tiempo promedio el 26 de septiembre en Aeropuerto El Dorado, Colombia - Weather Spark, n.d.)

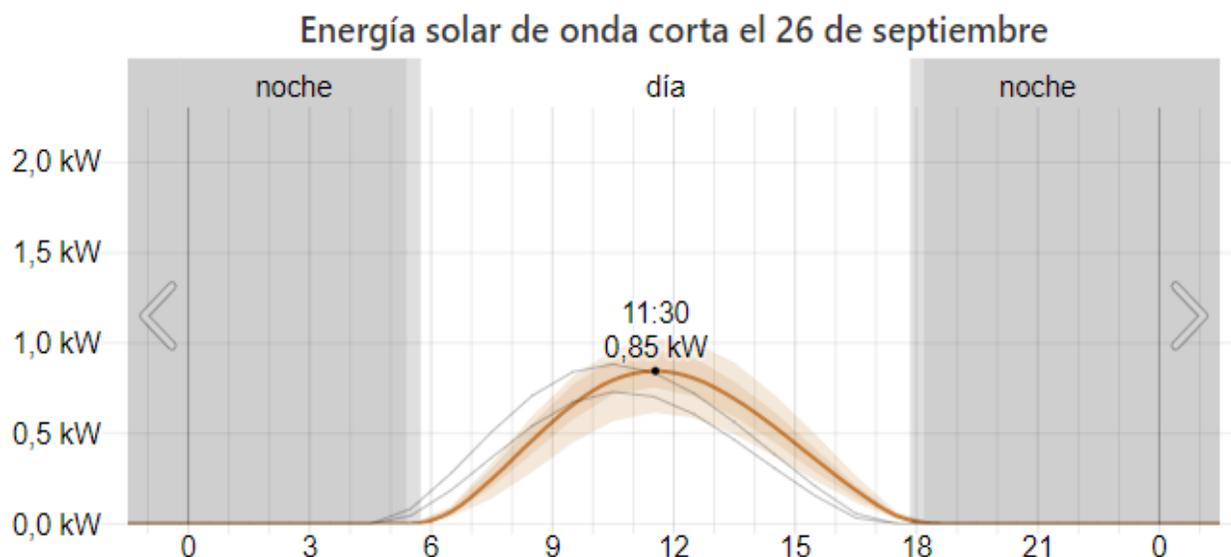


Figura 30 Radiación solar 26 de septiembre. Obtenida de: (Tiempo promedio el 26 de septiembre en Aeropuerto El Dorado, Colombia - Weather Spark, n.d.)

Al analizar los datos obtenidos de (*Bogotá, Colombia Weather History | Weather Underground*, n.d.) de la estación meteorológica del Aeropuerto el Dorado de los meses de septiembre y octubre obteniendo registros de 31 °C Y 34 °C en los picos más altos respectivamente, de igual manera se realizó el análisis de la radiación en el periodo comprendido entre el 12 de septiembre al 12 de octubre del año 2020 donde el pico más alto se registró el primer día analizado con un valor de 0,88 Kw.

Cabe resaltar que no se tuvo en cuenta los datos de la plataforma GIOVANI de la NASA porque para el mes de septiembre se presentó un inconveniente en la página y se tuvieron que reprocesar los datos impidiendo hacer uso de estos y para el mes de octubre aún no estaban disponibles.

6.4. Modelación numérica

A través del análisis térmico se determinaron las temperaturas superficiales tanto de la parte superior, como de la parte inferior (T1 y T3) de cada uno de los puentes y se realizó la respectiva comparación de la parte teórica con la parte práctica, para ello se debe tener en cuenta que los puentes se deben encontrar en un punto de equilibrio para realizar el análisis correspondiente. Véase en la figura 31.

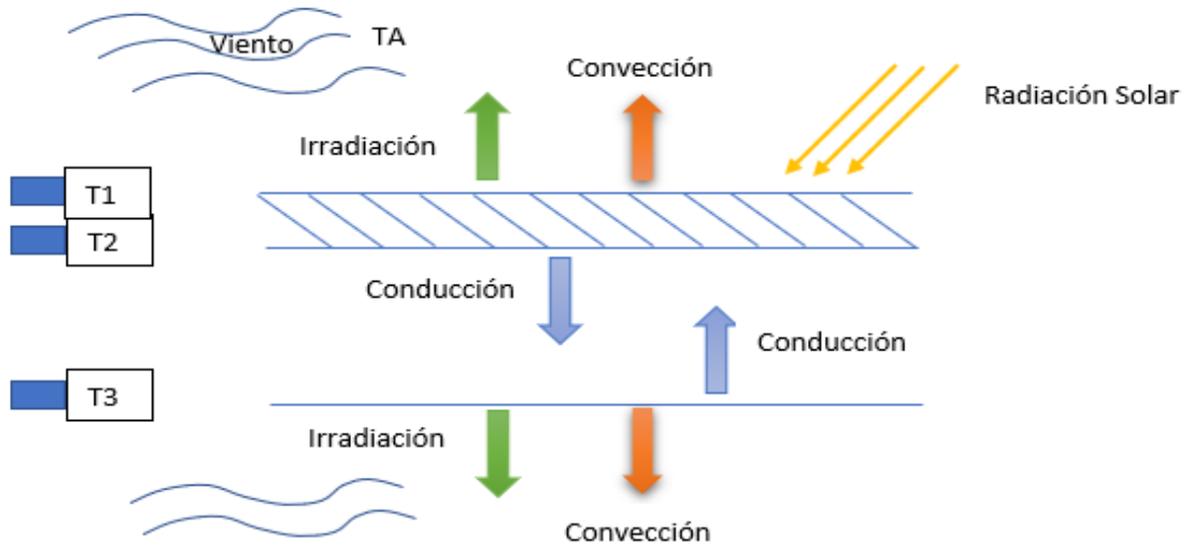


Figura 31 Equilibrio Térmico en el puente. Adaptado de: Patarroyo & Meneces 2020.

El equilibrio térmico está dado por la siguiente ecuación.

$$E_s + E_{cv} + E_i + E_{cd} = 0 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$E_s = \text{Energía Solar } w/m^2$

$E_{cv} = \text{Energía por Convección}$

$E_i = \text{Energía por Irradiación}$

$E_{cd} = \text{Energía por Conducción}$

$E_s = \text{Energía Solar } w/m^2$

$$E_s = \alpha * \text{Radiación Solar} \quad \text{Ecuación 2}$$

$\alpha = \text{Coeficiente de Absorción del asfalto}$

E_{cv} = Energía por Convección

Para hallar la energía por convección se debe determinar el coeficiente de convección (h_c) que dependiendo de la velocidad del viento puede variar (V), el cual se obtiene de las estaciones meteorológicas de la ciudad (Estación meteorológica El Dorado)

$$h_c = 6 + 4V, \quad V \leq 5 \frac{m}{s} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$h_c = 7.4 V^{0.78}, \quad V > 5 \frac{m}{s} \quad \text{Ecuación 4}$$

Al obtener el resultado de la energía de convección se puede determinar según:

$$E_{cv} = hA (T_1 - T_A) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$A = \text{Área a estudiar}$

$T_1 = \text{Temperatura Superficial en la parte superior}$

$T_A = \text{Temperatura Diaria}$

E_i = Energía por Irradiación

$$E_i = \varepsilon \sigma A (T^4 - T_A^4) \quad \text{Ecuación 6}$$

$\varepsilon = \text{Emisividad}$

$\sigma = \text{Constante de Boltzmann}$

$A = \text{Área a estudiar}$

$T = \text{Temperatura Superficial}$

$TA = \text{Temperatura Diaria}$

$Ecd = \text{Energía por Conducción}$

$$Ecd = \frac{T3-T1}{\left(\frac{Lc}{Kc \cdot A}\right) + \left(\frac{La}{Ka \cdot A}\right)} \quad \text{Ecuación 7}$$

$La = \text{Longitud del asfalto}$

$Lc = \text{Longitud del concreto}$

$A = \text{Área a estudiar}$

$Kc = \text{Constante del concreto}$

$Ka = \text{Constante del acero}$

Equilibrio de energías

Remplazando la ecuación 2, 5, 6 y 7 en la ecuación 1 se obtiene:

$$\alpha * \text{Radiación Solar} + hA (T1 - TA) + \varepsilon \sigma A (T^4 - TA^4) + \frac{T3-T1}{\left(\frac{Lc}{Kc \cdot A}\right) + \left(\frac{La}{Ka \cdot A}\right)} = 0 \quad \text{Ecuación 8}$$

Asfalto:

Con base en la ecuación 8 se resuelve la parte superior del tablero, se tiene en cuenta la dirección de la energía, así:

$$\alpha * \text{Radiación Solar} + hA (TA - T1) + \varepsilon \sigma A (0^4 - T1^4) + \frac{T1-T3}{\left(\frac{Lc}{Kc \cdot A}\right) + \left(\frac{La}{Ka \cdot A}\right)} = 0 \quad \text{Ecuación 9}$$

Concreto:

Con base en la ecuación 8 se resuelve la parte inferior del tablero, se tiene en cuenta la dirección de la energía, así:

$$hA (T3 - TA) + \varepsilon \sigma A (T3^4 - TA^4) + \frac{T3-T1}{\left(\frac{Lc}{Kc \cdot A}\right) + \left(\frac{La}{Ka \cdot A}\right)} = 0 \quad \text{Ecuación 10}$$

Igualando la ecuación 9 con la ecuación 10 se obtiene:

$$\alpha * \text{Radiación Solar} + hA (TA - T1) + \varepsilon \sigma A (0^4 - T1^4) + \frac{T1-T3}{\left(\frac{Lc}{Kc \cdot A}\right) + \left(\frac{La}{Ka \cdot A}\right)} = hA (T3 - TA) + \varepsilon \sigma A (T3^4 - TA^4) + \frac{T3-T1}{\left(\frac{Lc}{Kc \cdot A}\right) + \left(\frac{La}{Ka \cdot A}\right)} \quad \text{Ecuación 11}$$

7. Resultados

En la elaboración y planteamiento del proyecto se realizó un análisis de las estructuras del puente de la Av. Rojas con Calle 26 y del puente de Siberia-Cota en la Vía Bogotá – La Vega, tomando fotografías en horas de la mañana en el periodo de 5:00 am – 6:30 am, y en horas de la tarde en el periodo comprendido entre la 1:00 pm – 2:30 pm puesto que en estos horarios es donde se presentan las variaciones de temperatura desde las más altas hasta la más bajas, se dio inicio a la toma de fotografía in situ el 12 de septiembre de 2020 en el puente de la Av. Rojas con Calle 26 y se terminó el día 04 de octubre, mientras que en el puente de Siberia se dio inicio el 20 de septiembre y se terminó el 12 de octubre del 2020. Para realizar el análisis de los datos se hicieron en diferentes puntos del puente tanto de la parte inferior como de la parte superior.

7.1. Análisis Puente Av. Rojas con Calle 26

En la figura 32, figura 33, figura 34, figura 35, se podrá observar los puntos analizados en el software FLIR TOOLS que se tomaron en los diferentes puntos del puente de la Av. Rojas con Calle 26.

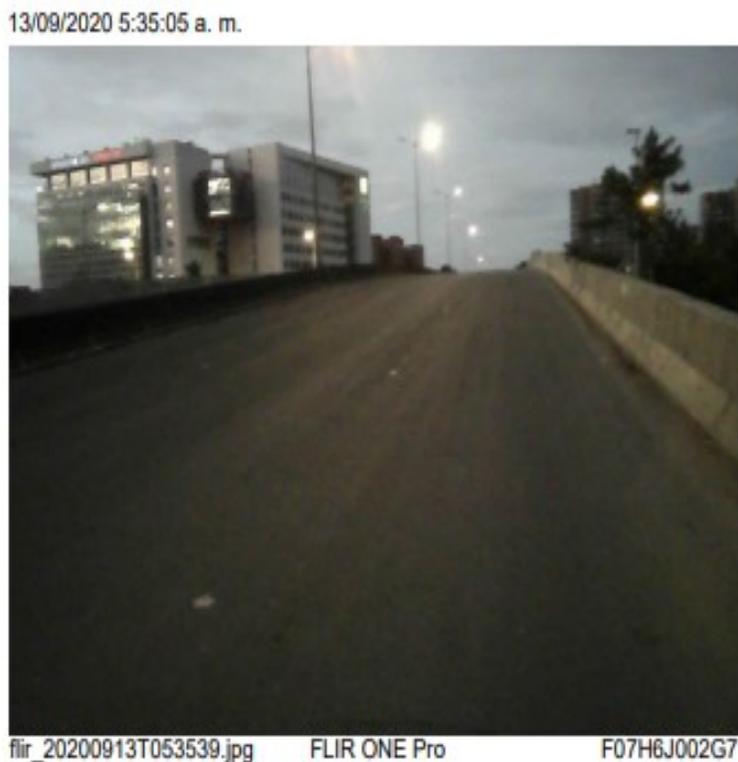
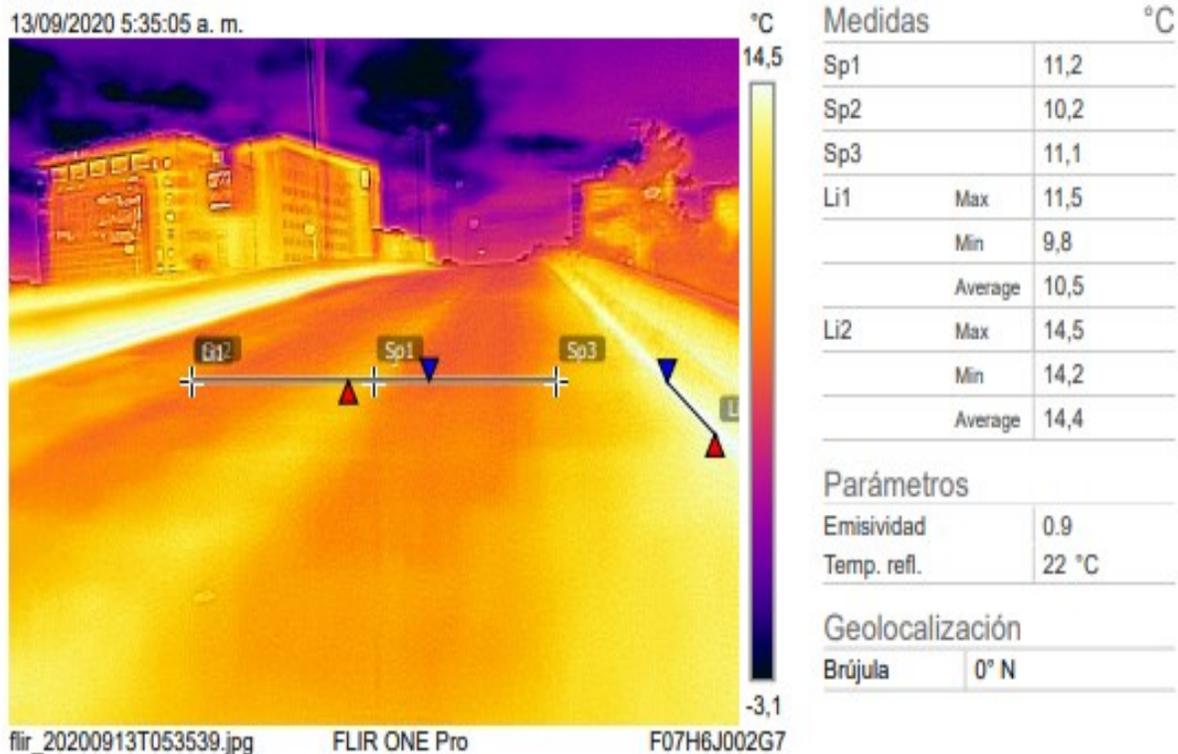


Figura 32 Punto 1 Tablero Sentido Norte - Sur Puente Av. Rojas con Calle 26. Obtenido de: Software FLIR TOOLS

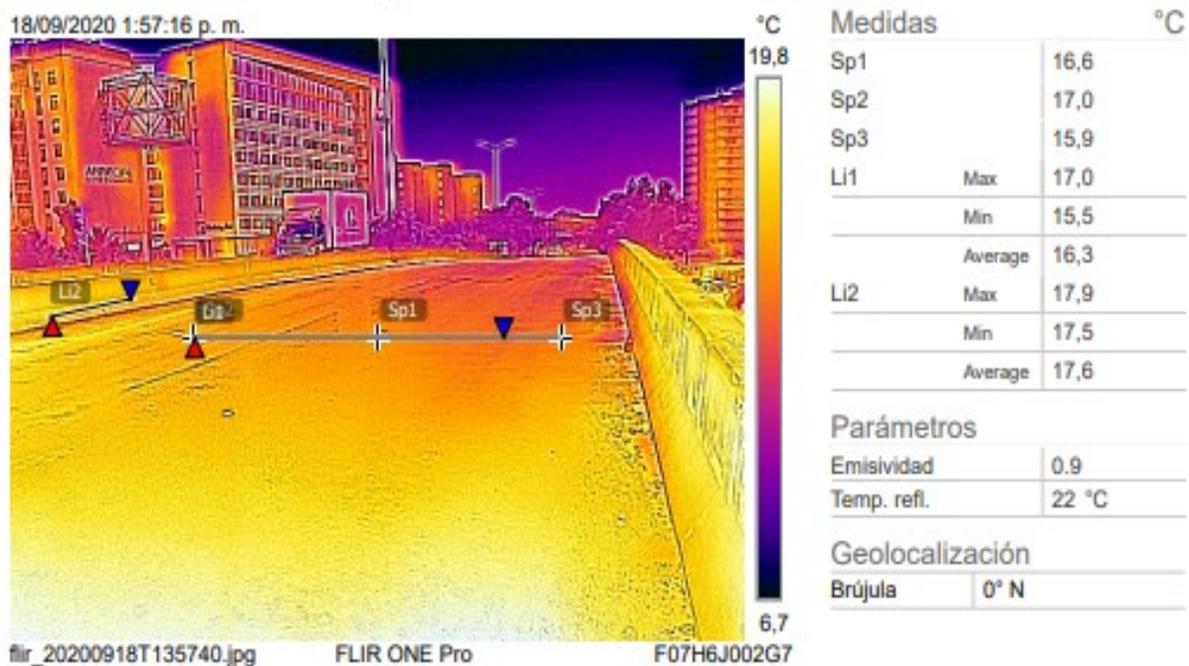
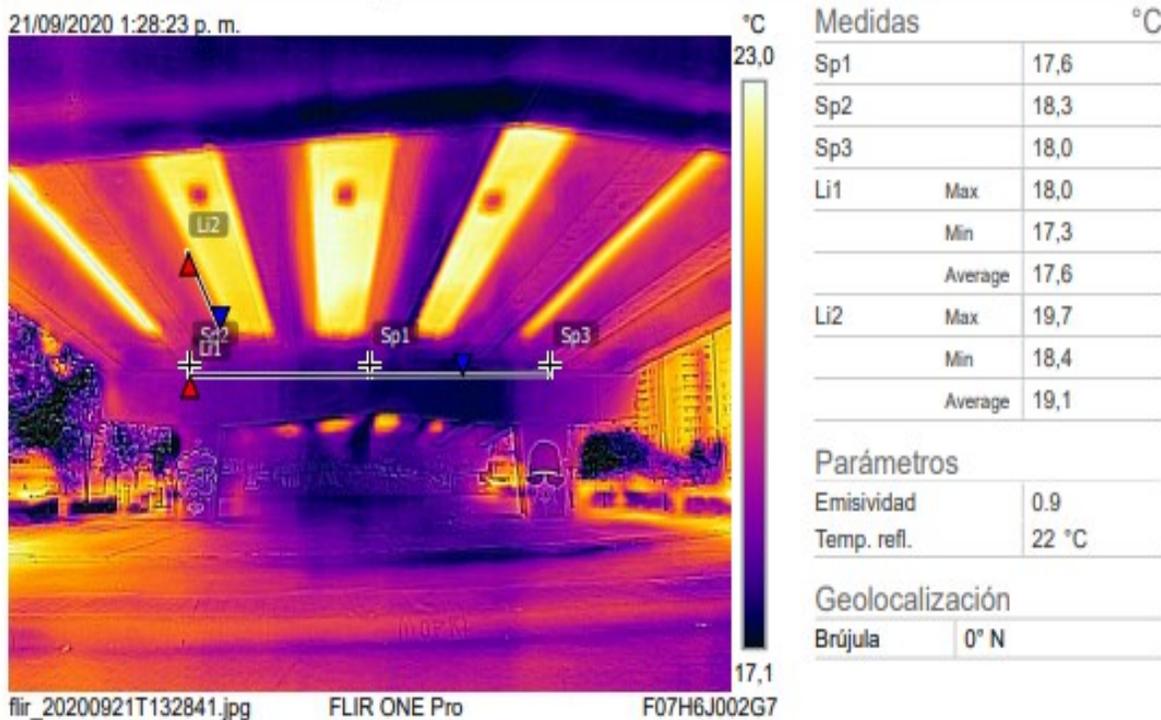


Figura 33 Punto 2 Tablero Sentido Norte - Sur Puente Av. Rojas con Calle 26. Obtenido de: Software FLIR TOOLS



21/09/2020 1:28:23 p. m.



flir_20200921T132841.jpg FLIR ONE Pro F07H6J002G7

Figura 34 Punto 3 Parte inferior Puente Av. Rojas con Calle 26. Obtenido de: Software FLIR TOOLS



Figura 35 Punto 4 Parte inferior Puente Av. Rojas con Calle 26. Obtenido de: Software FLIR TOOLS

Con los resultados obtenidos de los informes generados en el Software FLIR TOOL'S se evidencia la temperatura promedio para los días en los que se realizó la toma de datos en horas de la mañana y de la tarde. Como se refleja en la figura 36, figura 37, figura 38, figura 39, figura 40, figura 41, figura 42, figura 43.

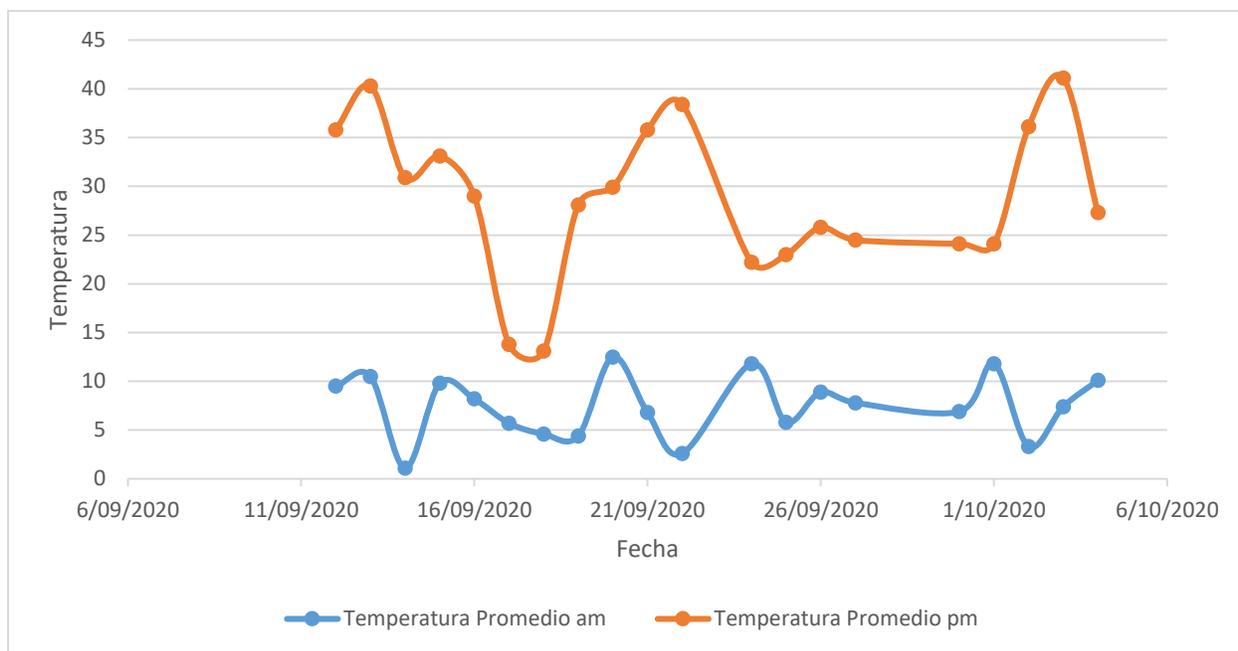


Figura 36 Punto 1 Temperatura Promedio Tablero Superior Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia

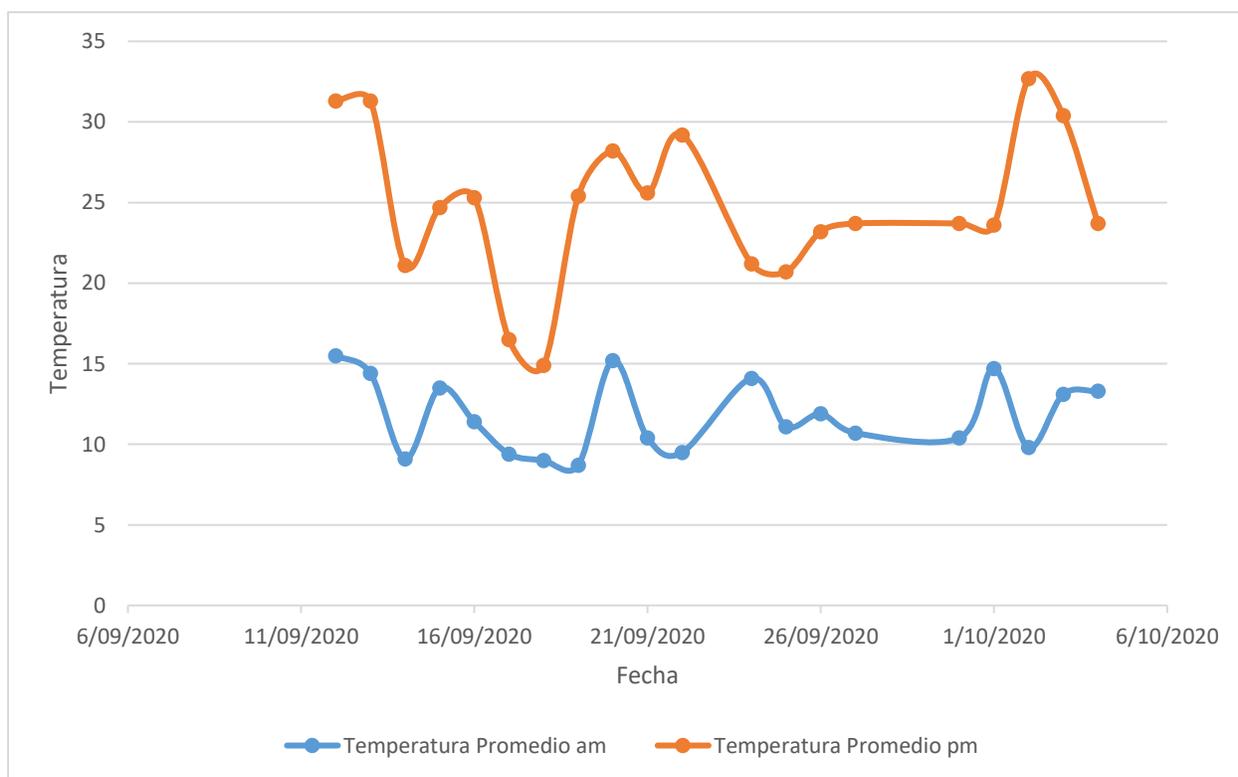


Figura 37 Punto 1 Temperatura Promedio Bordillo Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia

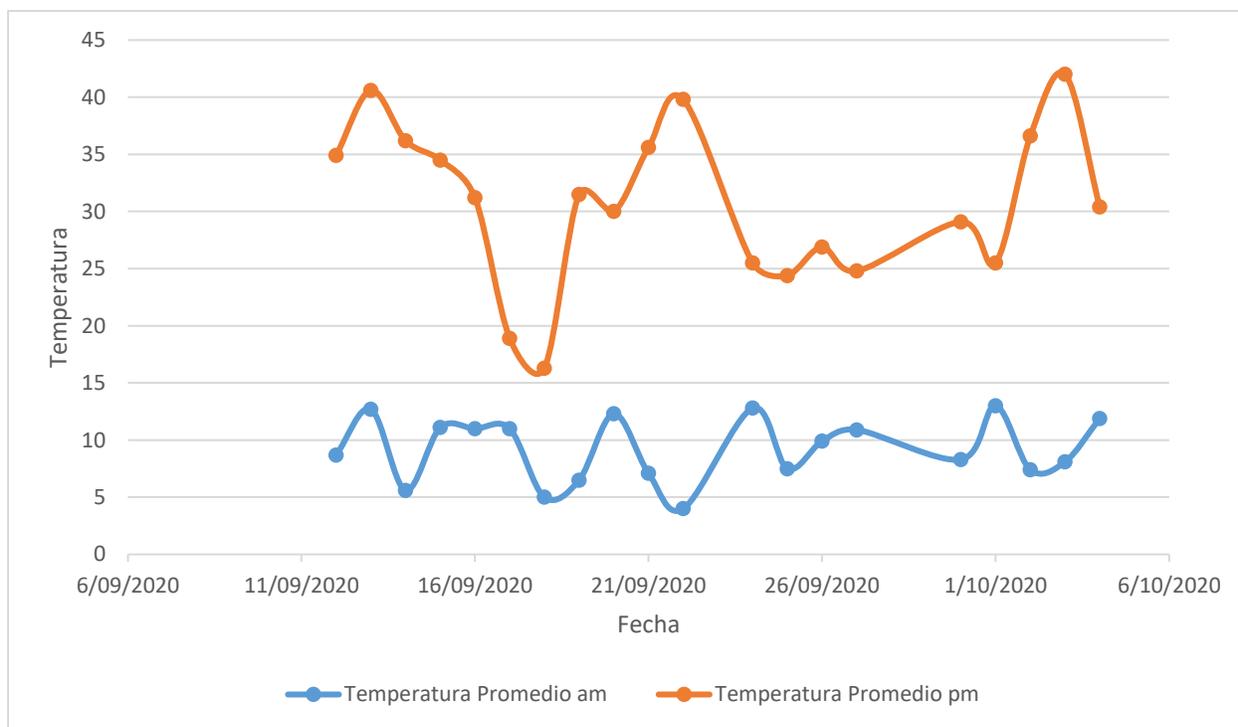


Figura 38 Punto 2 Temperatura Promedio Tablero Superior Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia

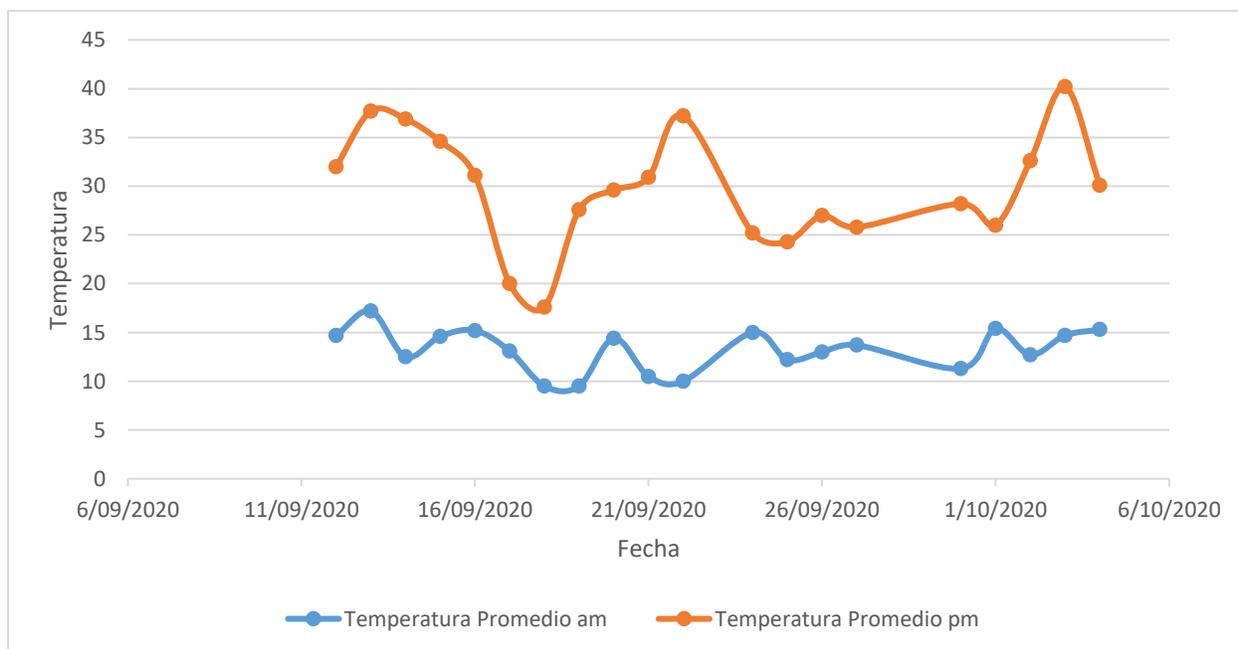


Figura 39 Punto 2 Temperatura Promedio Bordillo Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia

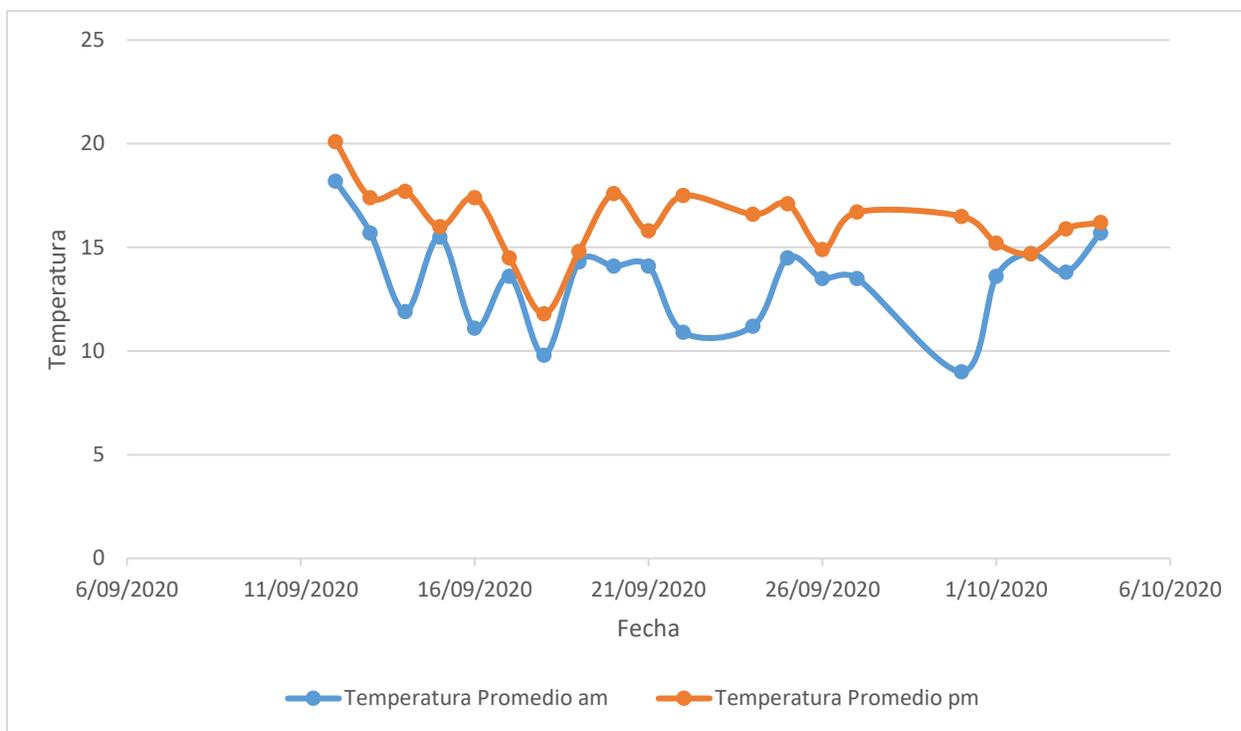


Figura 40 Punto 3 Temperatura Promedio Viga Pórtico Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia

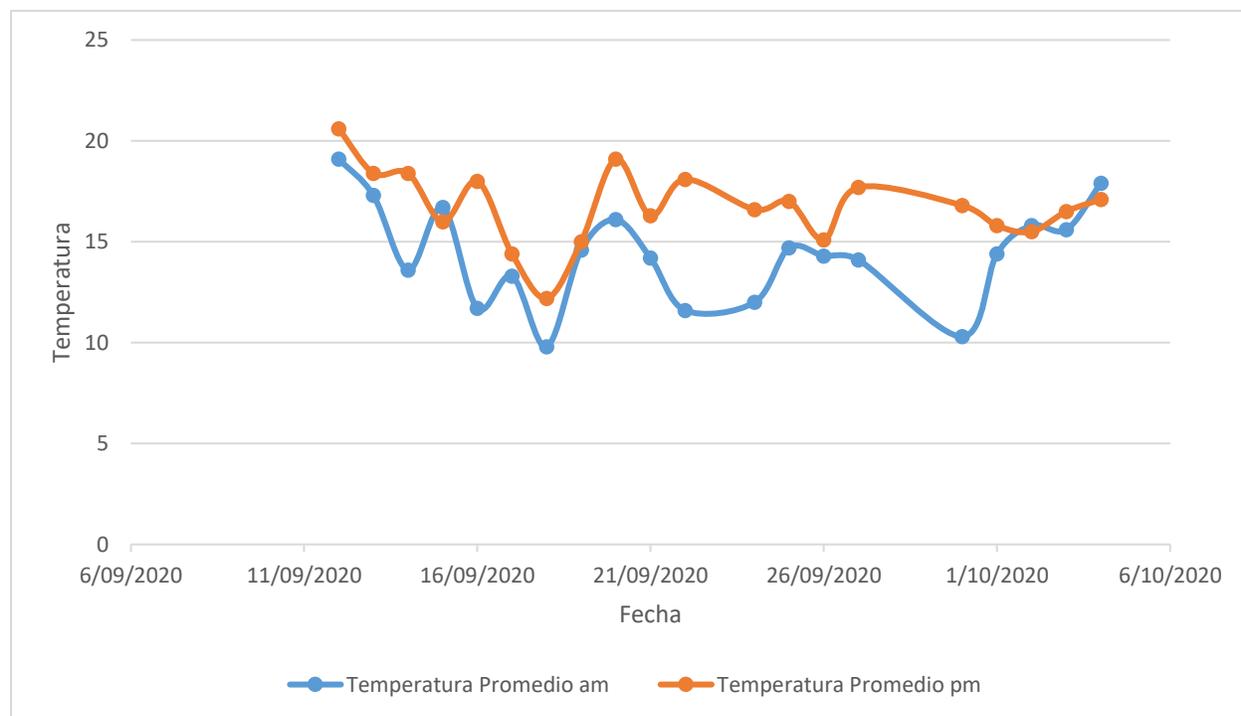


Figura 41 Punto 3 Temperatura Promedio Viga Cajón Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia

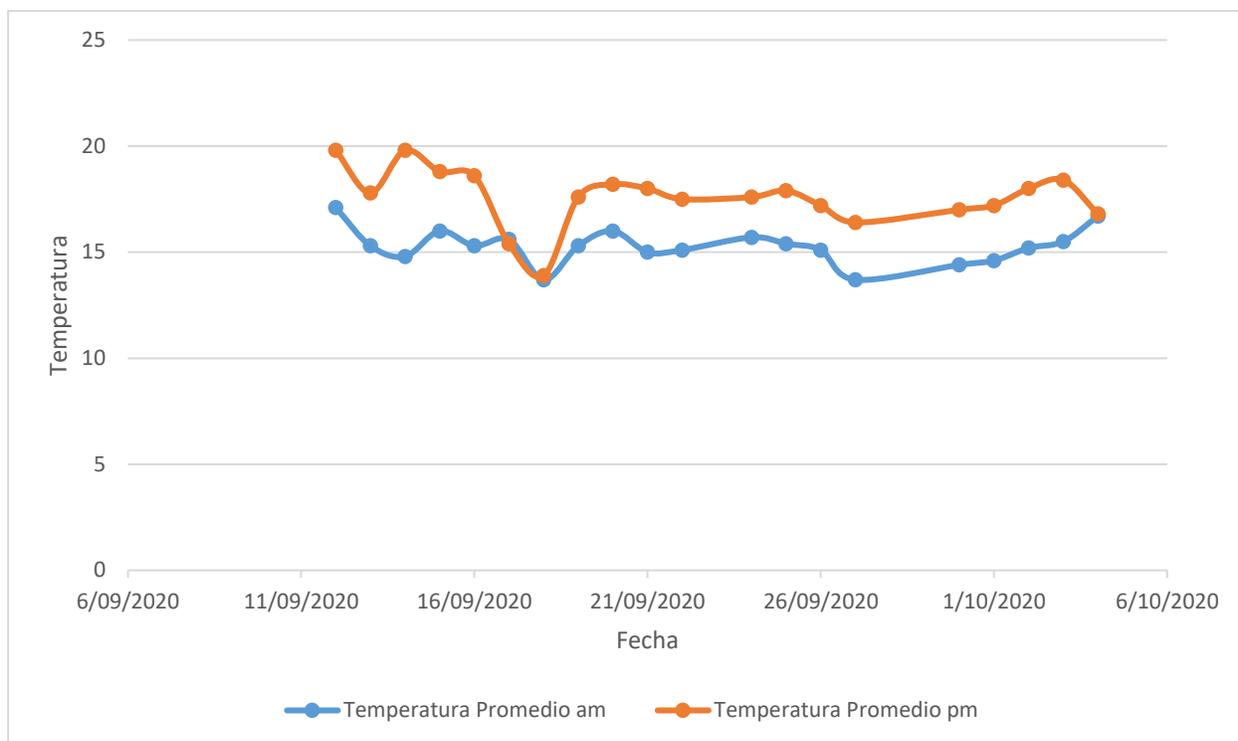


Figura 42 Punto 4 Temperatura Promedio Viga Pórtico Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia

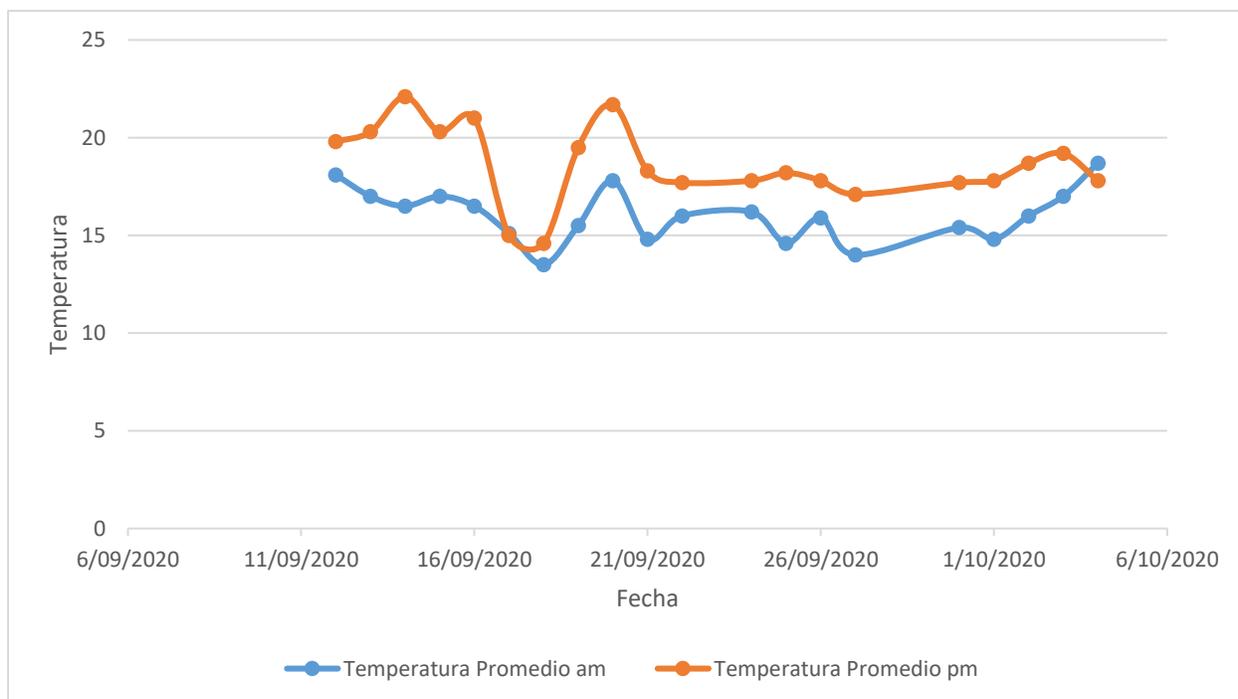


Figura 43 Punto 4 Temperatura Promedio Viga Cajón Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia

Como se puede evidenciar en la figura 40, figura 41, figura 42, figura 43, que corresponden a la parte superior de puente (tablero y bordillo) se observan temperaturas mayores en horas de la tarde debido a que en este horario la presencia de radiación es mucho mayor que la radiación en horas de la mañana, a diferencia del punto 3 y 4 que corresponden a la figura 44, figura 45, figura 46, figura 47, donde las diferencias de temperatura en los dos horarios es mucho menor ya que estos no están expuestos directamente a la radiación, lo cual genera que la temperatura no varíe tanto de un horario a otro.

Al realizar el análisis de las gráficas de los datos tomados de los informes generados en el software se puede apreciar que el día que presento una mayor temperatura en el puente de la Av. Rojas con Calle 26 fue el 03 de octubre. Como se puede ver en la figura 38.



Figura 44 Registro de mayor temperatura. Obtenido de: (Bogotá, Colombia Weather History | Weather Underground, n.d.)

Como se observa en la figura 44, el día en que se presenta mayor temperatura con un valor de 20 °C se obtuvieron de la estación meteorológica el Dorado, de igual manera se evidencia que

no precipitación alguna, con respecto a los resultados de los informes donde se presentó un pico máximo de 42,8 °C.

7.2. Análisis Puente Siberia Cota

En la figura 45, figura 46, figura 47, figura 48, se podrá observar los puntos analizados en el software FLIR TOOLS que se tomaron en los diferentes puntos del puente de Siberia Cota.

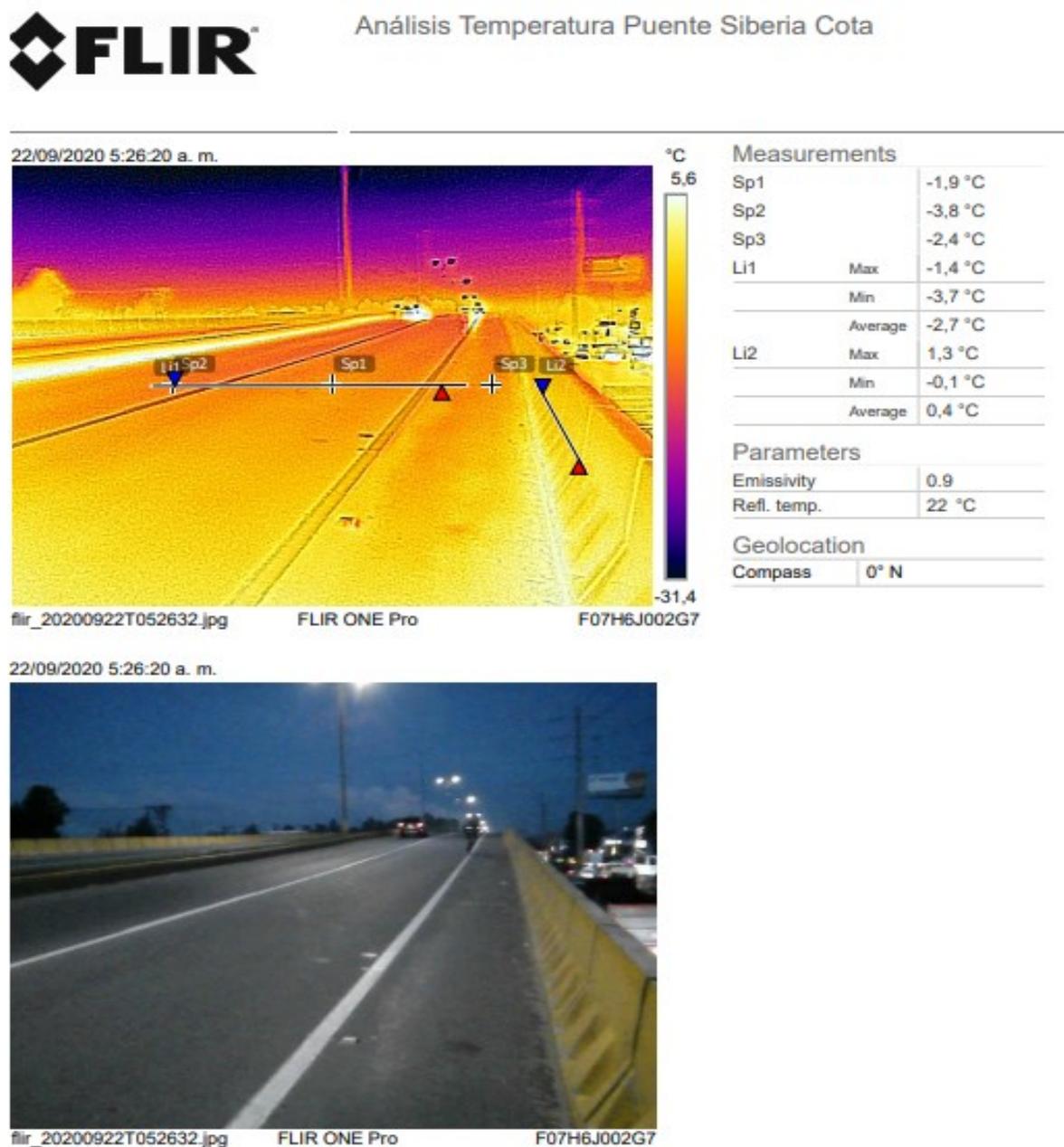
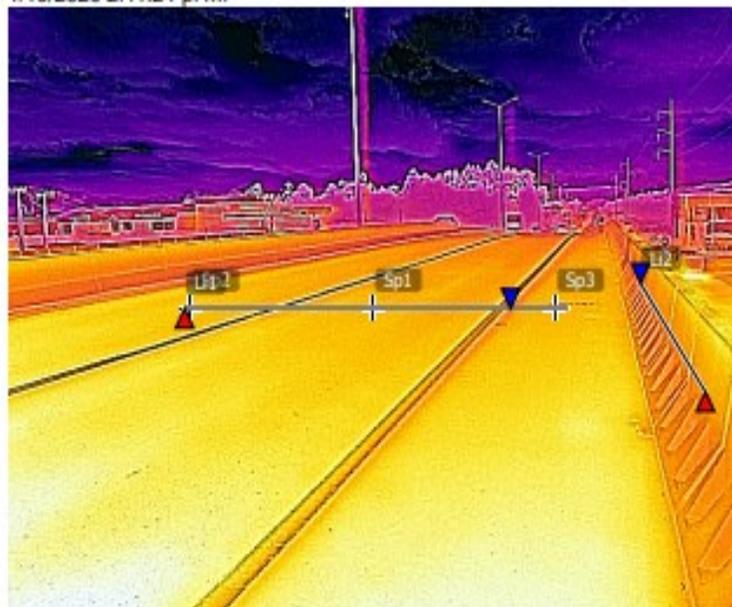


Figura 45 Punto 1 Tablero Puente Siberia Cota. Obtenido de: Software FLIR TOOLS



Análisis Temperatura Puente Siberia Cota

1/10/2020 2:11:24 p. m.



°C

32,8

7,4

Measurements

Sp1		28,6 °C
Sp2		29,6 °C
Sp3		28,5 °C
Li1	Max	29,6 °C
	Min	25,3 °C
	Average	28,6 °C
Li2	Max	28,0 °C
	Min	25,0 °C
	Average	26,7 °C

Parameters

Emissivity	0.9
Ref. temp.	22 °C

Geolocation

Compass	0° N
---------	------

flir_20201001T141136.jpg

FLIR ONE Pro

F07H6J002G7

1/10/2020 2:11:24 p. m.



flir_20201001T141136.jpg

FLIR ONE Pro

F07H6J002G7

Figura 46 Punto 2 Tablero Puente Siberia Cota. Obtenido de: Software FLIR TOOLS



Análisis Temperatura Puente Siberia Cota

6/10/2020 5:34:46 a. m.



Measurements

Sp1		9,9 °C
Sp2		8,0 °C
Sp3		9,8 °C
Li1	Max	10,2 °C
	Min	9,1 °C
	Average	9,9 °C
Li2	Max	9,3 °C
	Min	8,0 °C
	Average	8,6 °C

Parameters

Emissivity	0.9
Refl. temp.	22 °C

Geolocation

Compass	0° N
---------	------

flir_20201006T053504.jpg

FLIR ONE Pro

F07H6J002G7

6/10/2020 5:34:46 a. m.



flir_20201006T053504.jpg

FLIR ONE Pro

F07H6J002G7

Figura 47 Punto 3 Tablero Inferior Puente Siberia Cota. Obtenido de: Software FLIR TOOLS



Análisis Temperatura Puente Siberia Cota

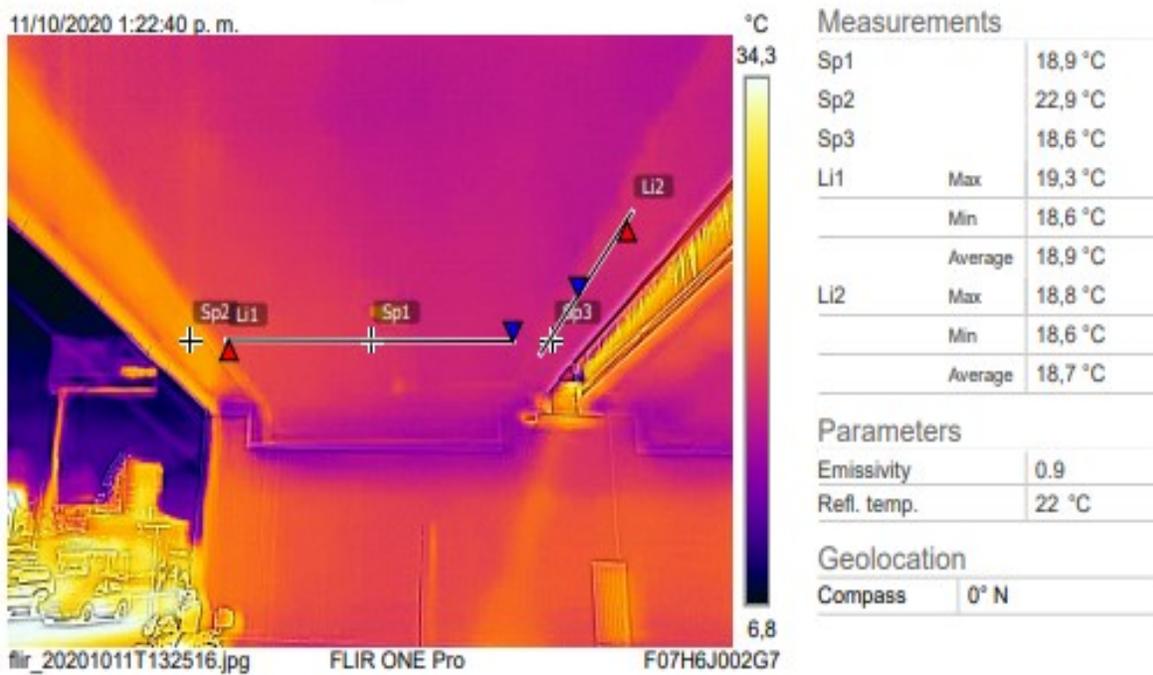


Figura 48 Punto 4 Tablero Inferior Puente Siberia Cota. Obtenido de: Software FLIR TOOLS

Con los resultados obtenidos de los informes generados en el Software FLIR TOOL'S se evidencia la temperatura promedio para los días en los que se realizó la toma de datos en horas de la mañana y de la tarde de los diferentes puntos. Como se refleja en la figura 49, figura 50, figura 51, figura 52, figura 53, figura 54, figura 55, figura 56.

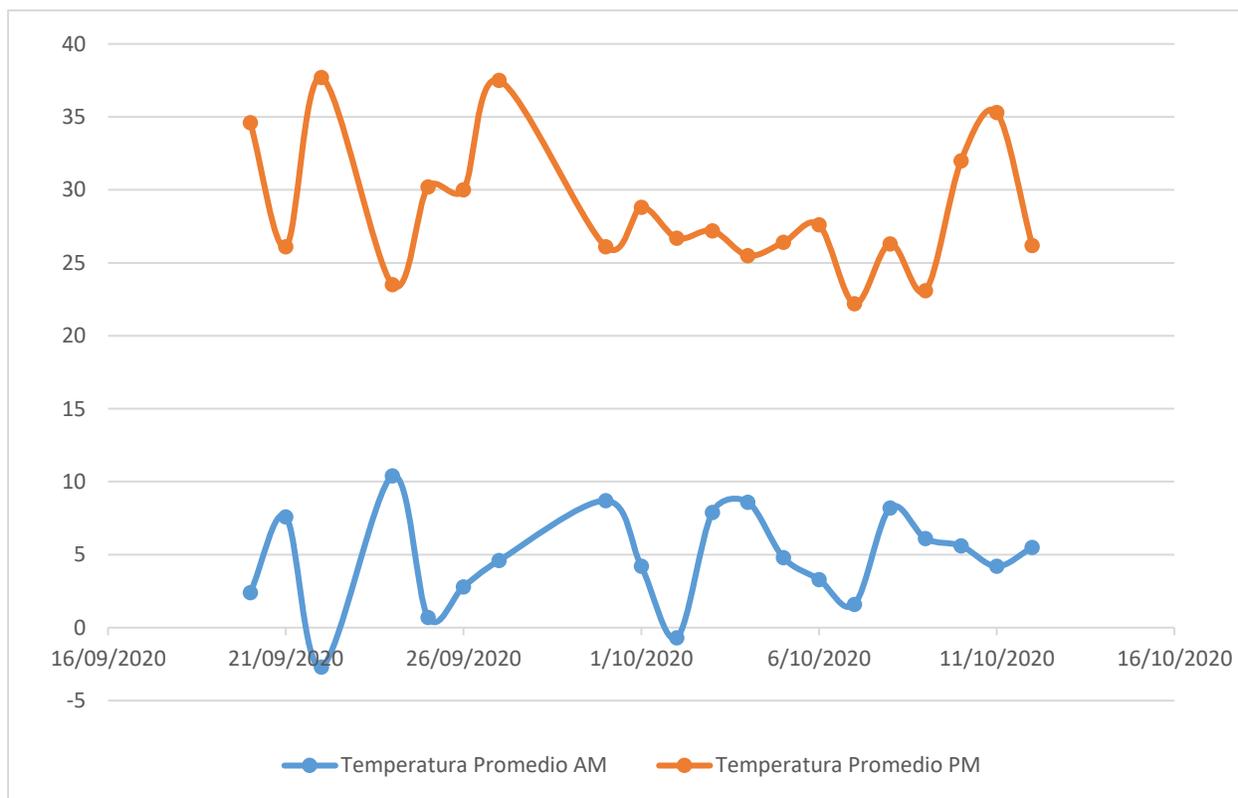


Figura 49 Punto 1 Tabero Superior Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.

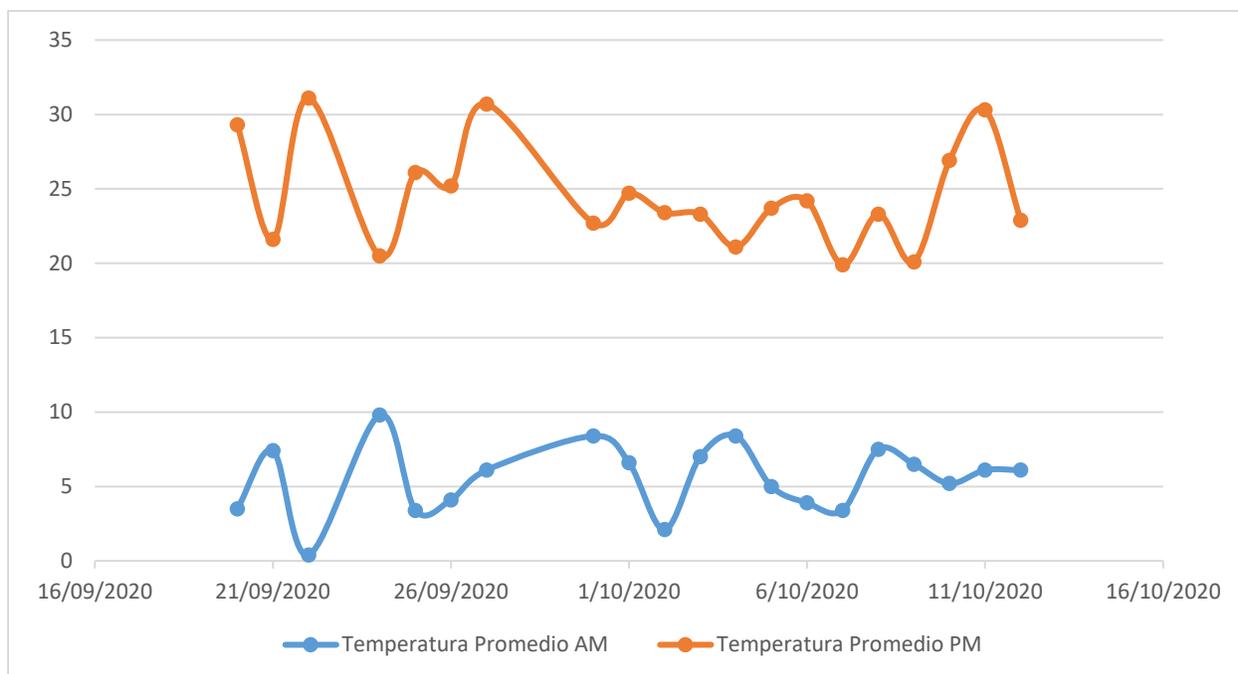


Figura 50 Punto 1 Bordillo Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.

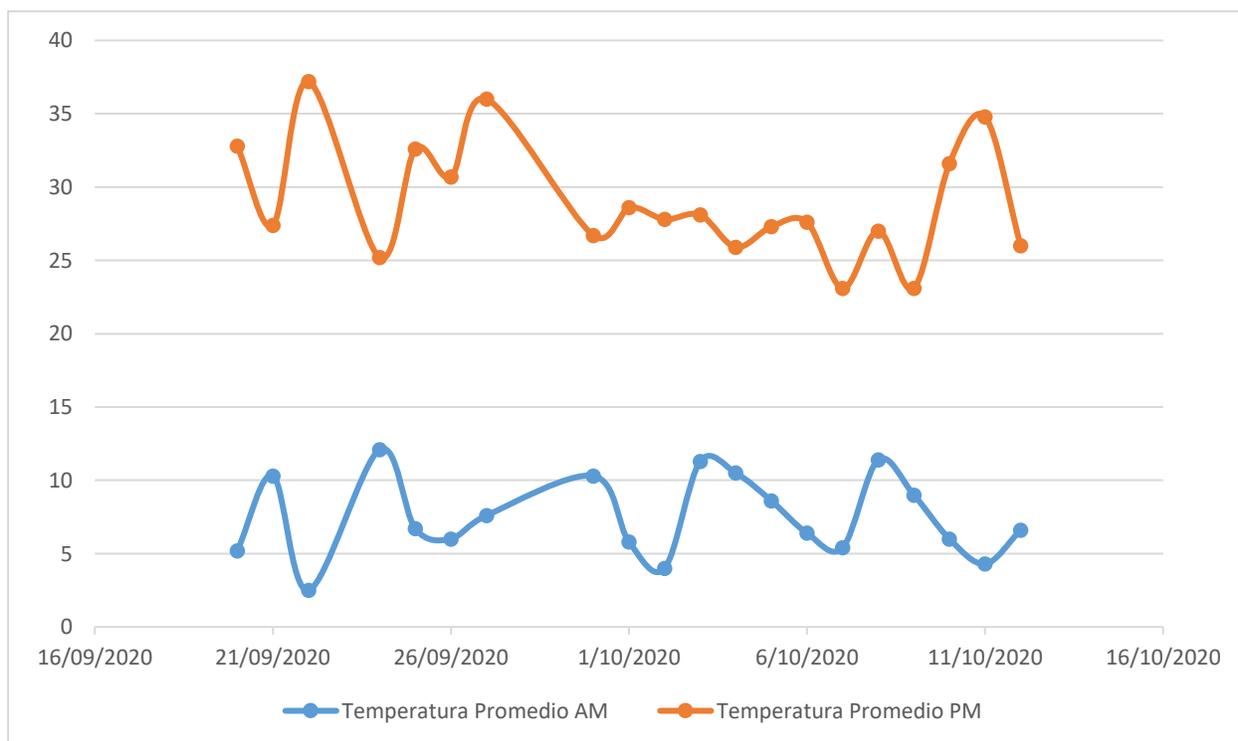


Figura 51 Punto 2 Tablero Superior Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.

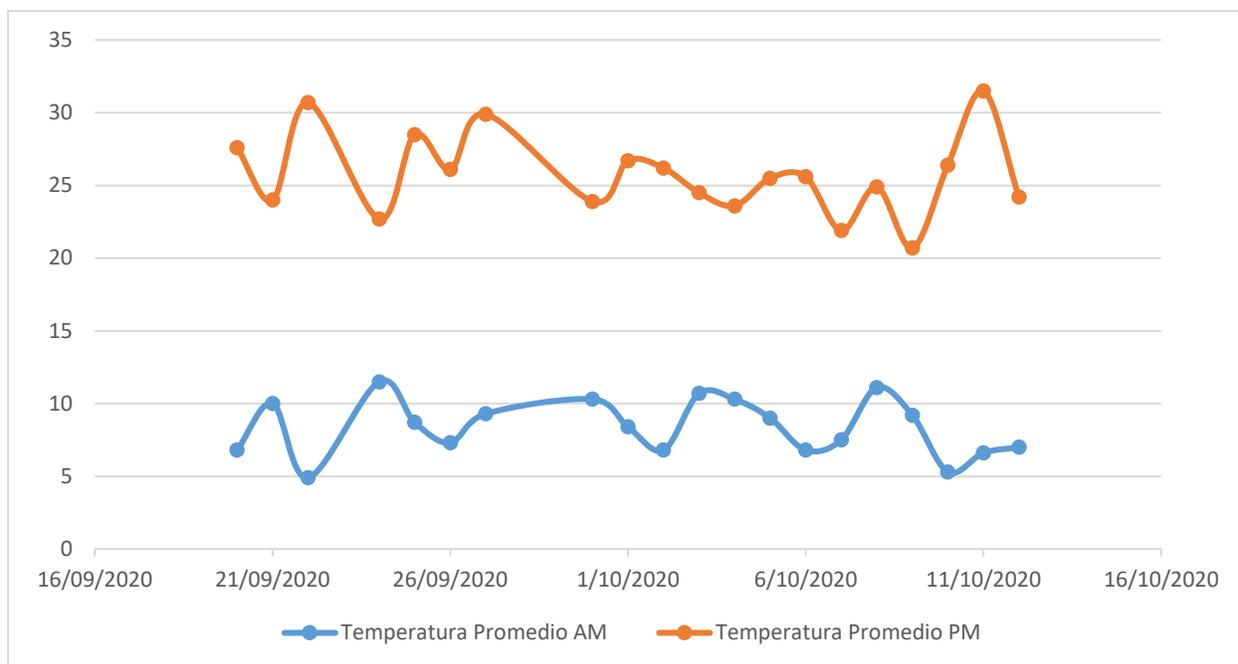


Figura 52 Punto 2 Bordillo Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.

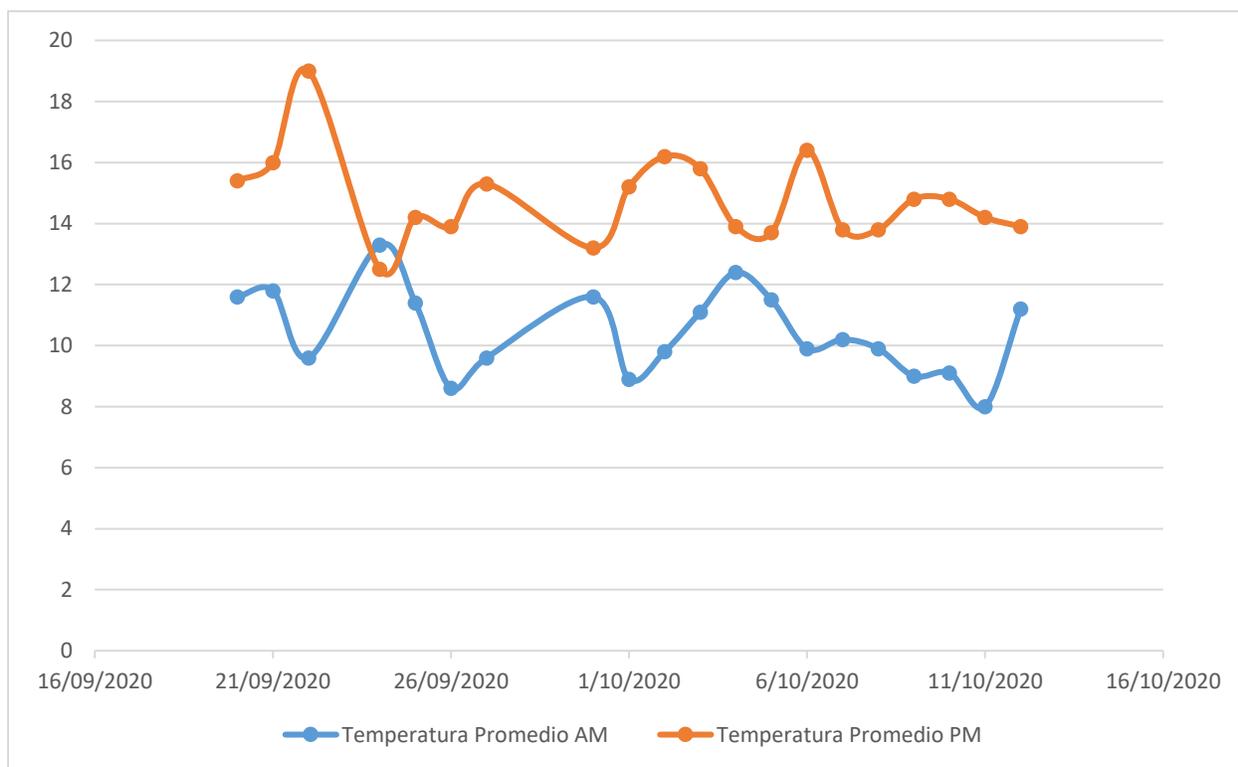


Figura 53 Punto 3 Tablero Inferior Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.

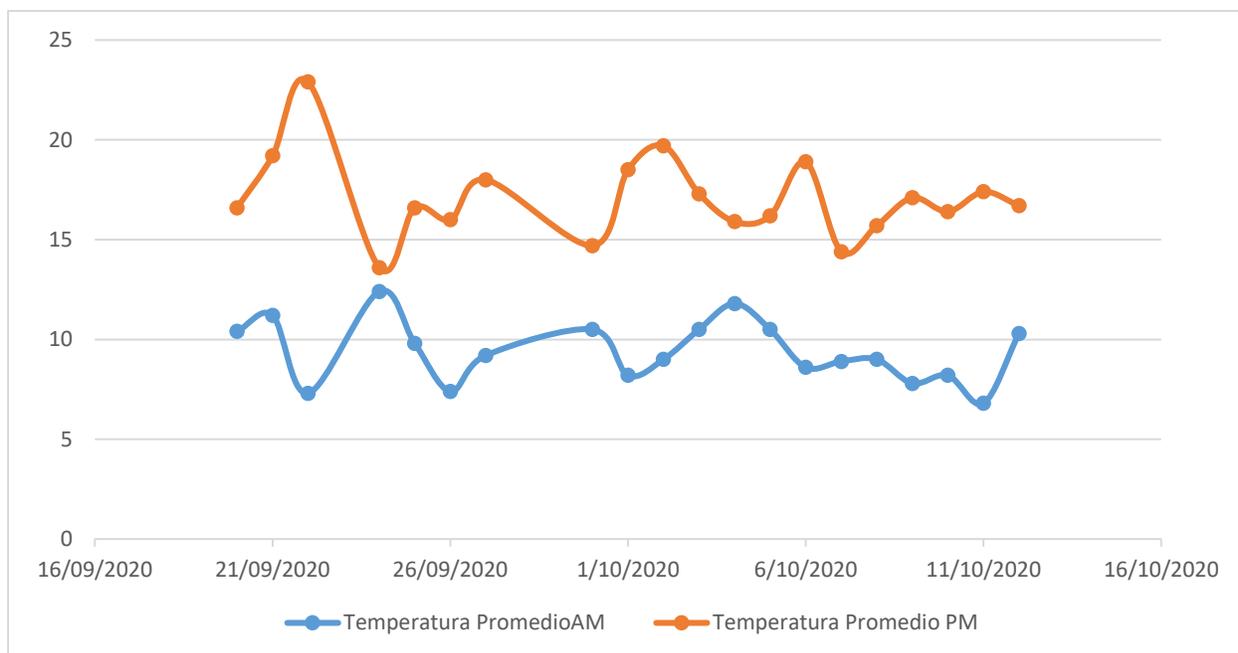


Figura 54 Punto 3 Tablero Borde Exterior Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.

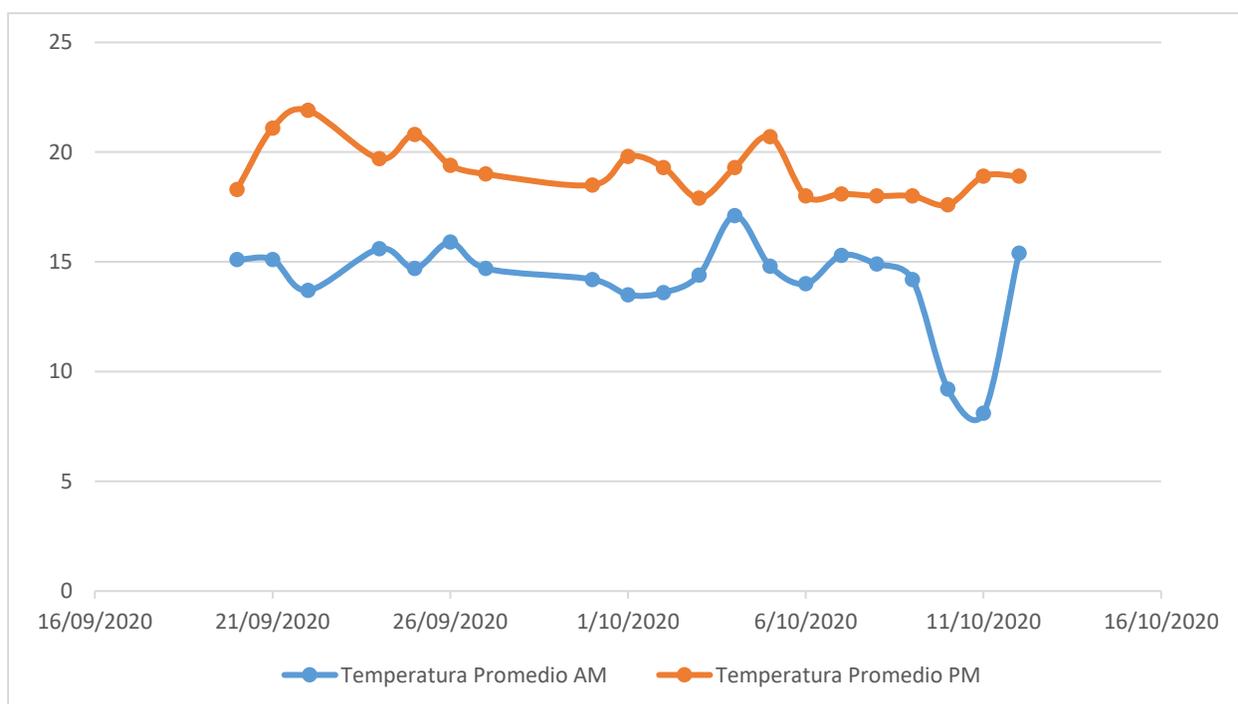


Figura 55 Punto 4 Tablero Inferior Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.

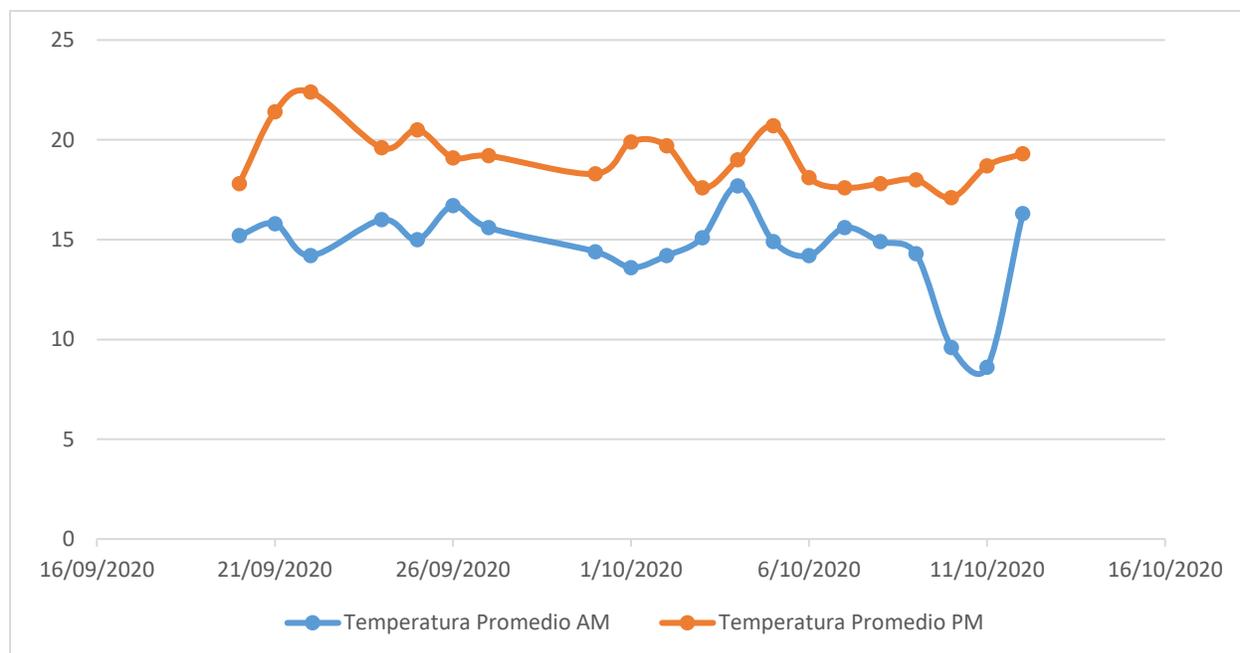


Figura 56 Punto 4 Tablero Borde Interno Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.

Como se observa en la figura 49, figura 50, figura 51, figura 52, las cuales corresponden a la parte superior de puente (tablero y bordillo) se evidencian temperaturas menores en horas de la mañana debido a que en este horario la presencia de radiación es mucho menor que la radiación en horas de la tarde, a diferencia del punto 3 y 4 que corresponden a la figura 53, figura 55, del tablero inferior donde las diferencias de temperatura en los dos horarios es mucho menor ya que estos no están expuestos directamente a la radiación, lo cual genera que la temperatura no varíe tanto de un horario a otro, por otra parte en la figura 54 y la figura 56, que corresponden al tablero borde externo y tablero borde interno se aprecia que las temperaturas del tablero borde externo tienen una mayor variación respecto a las temperaturas del tablero borde interno.

Al realizar el análisis de las gráficas de los datos tomados de los informes generados en el software se puede apreciar que el día que presentó una mayor temperatura en el puente de Siberia Cota fue el 22 de septiembre. Como se puede ver en la figura 57.

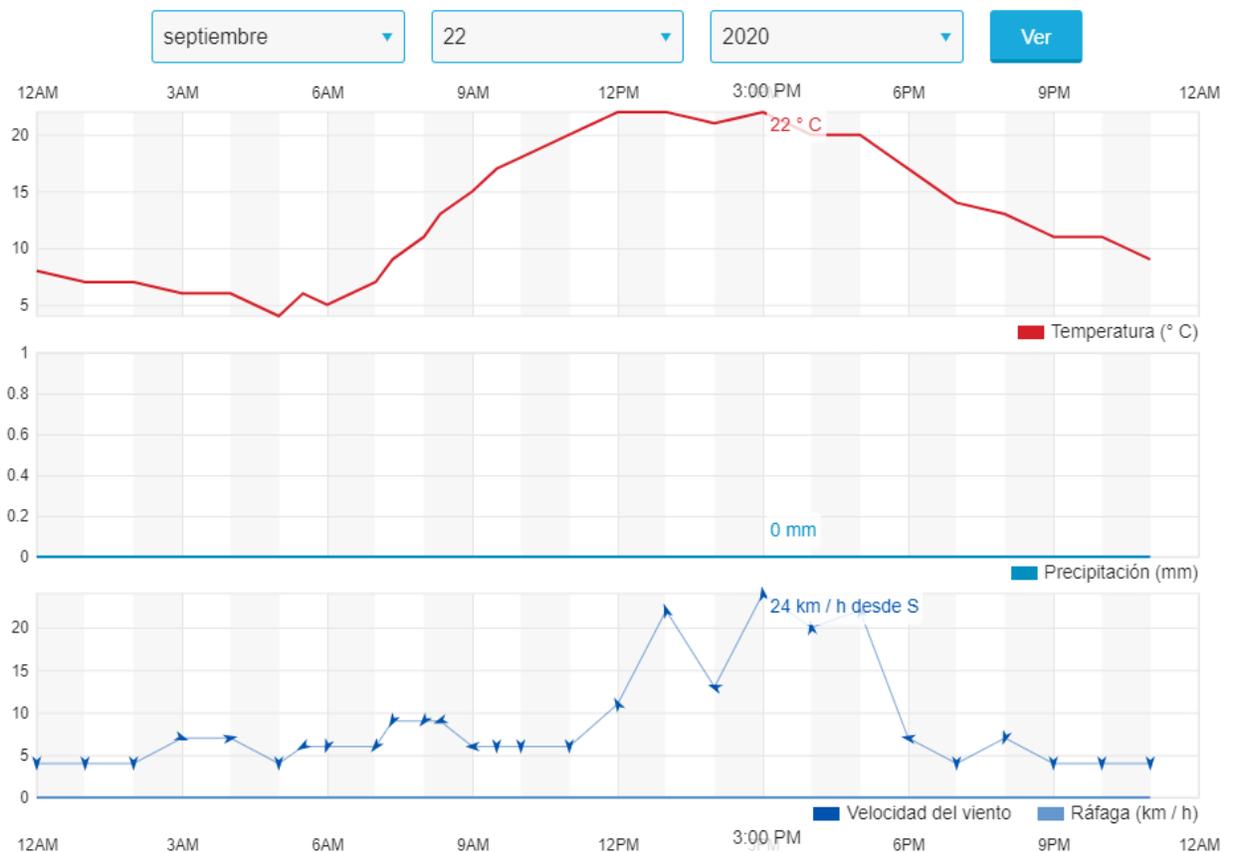


Figura 57 Registro de mayor temperatura. Obtenido de: (Bogotá, Colombia Weather History | Weather Underground, n.d.)

Como se puede ver en la figura 57, el día en que se presenta mayor temperatura con un valor de 22 °C se obtuvieron de la estación meteorológica el Dorado, de igual manera se evidencia que no precipitación alguna, con respecto a los resultados de los informes donde se presentó un pico máximo de 39,4 °C.

8. Temperatura superficial

8.1. Puente Av. Rojas con Calle 26

Una vez resuelta la ecuación se obtiene como resultado dos variables las cuales son incógnitas T1 y T3, al dar solución al conjunto de ecuaciones se pudo determinar los valores de las temperaturas tanto de la parte superior como de la parte inferior de cada uno de los días en estudio, en la figura 58 y la figura 59 se ve reflejado el resultado del análisis.

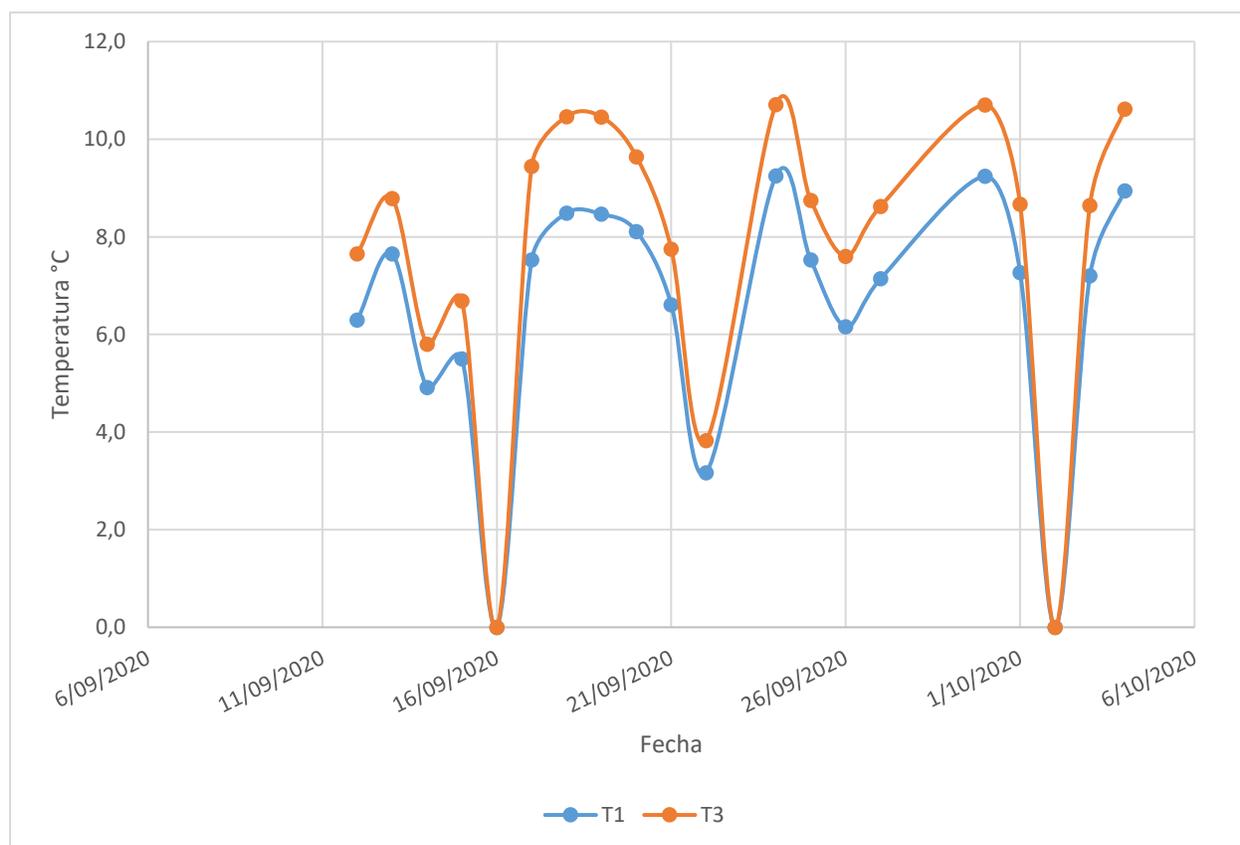


Figura 58 Temperatura Superficial de la Mañana Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia.

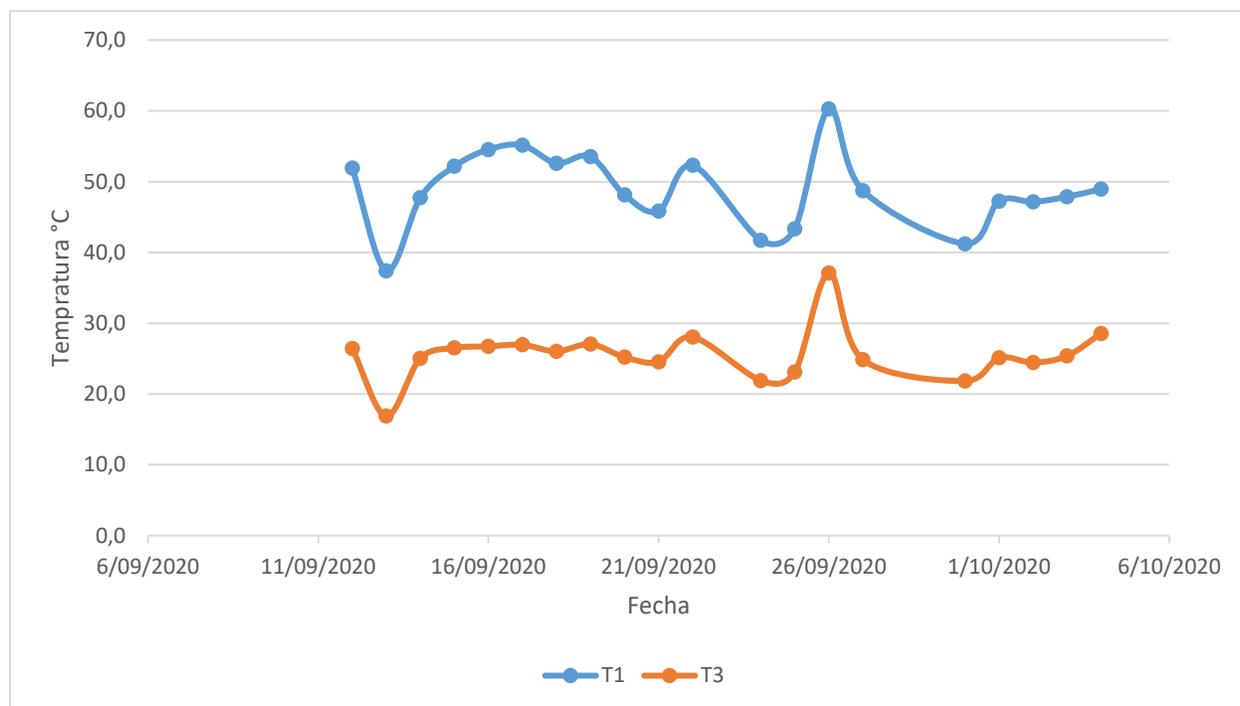


Figura 59 Temperatura Superficial de la Tarde Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia.

Una vez realizado el análisis de la temperatura superficial T1, del puente de la Av. Rojas con Calle 26 teniendo en cuenta las diferentes variables de la ecuación como radiación solar, convección, irradiación y conducción, también se realizó el mismo procedimiento para la parte inferior T3, pero a diferencia que en esta solo se hace uso de las variables conducción, irradiación y convección teniendo en cuenta que esta parte no está expuesta directamente a la radiación solar, por lo cual deducimos y afirmamos que T1 tiene una mayor temperatura puesto que la parte superior está directamente expuesta a la radiación solar como se puede apreciar en la figura 63 donde su pico máximo alcanza temperaturas iguales o mayores a los 60 °C, mientras que la parte inferior su pico máximo supera los 35 °C.

Por otra parte, un fenómeno totalmente contrario ocurre en la figura 62, como se puede contemplar la temperatura T3 es mayor en horas de la mañana a la temperatura T1, esto debido a que en este horario el tablero no tiene una radiación directa, pero actúan otros factores del medio como el viento lo que genera que la temperatura superficial del tablero se encuentre por debajo de los valores de la temperatura de la parte inferior.

Con base en los valores obtenidos de la modelación numérica realizada se realizó la comparación con los datos obtenidos en campo durante el periodo en estudio, en la figura 60, figura 61, figura 62 y la figura 63 se podrán apreciar la variación de los resultados.

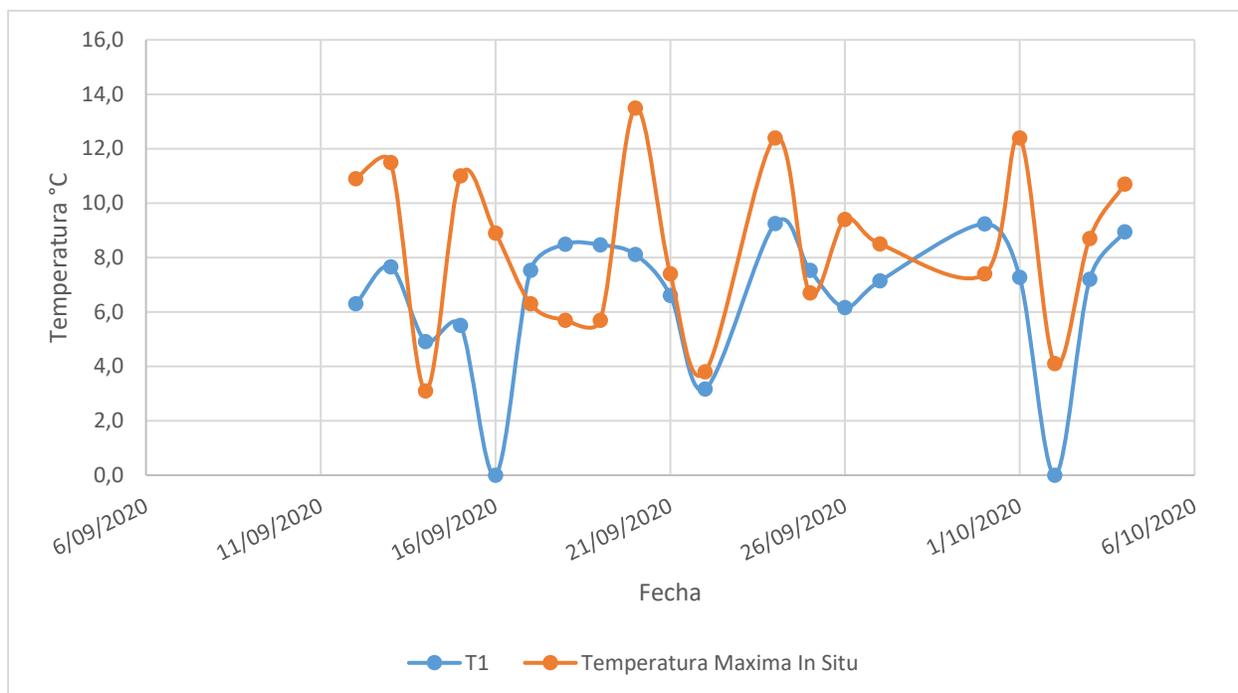


Figura 60 Comparación Temperatura Superficial T1 vs. In Situ AM Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia

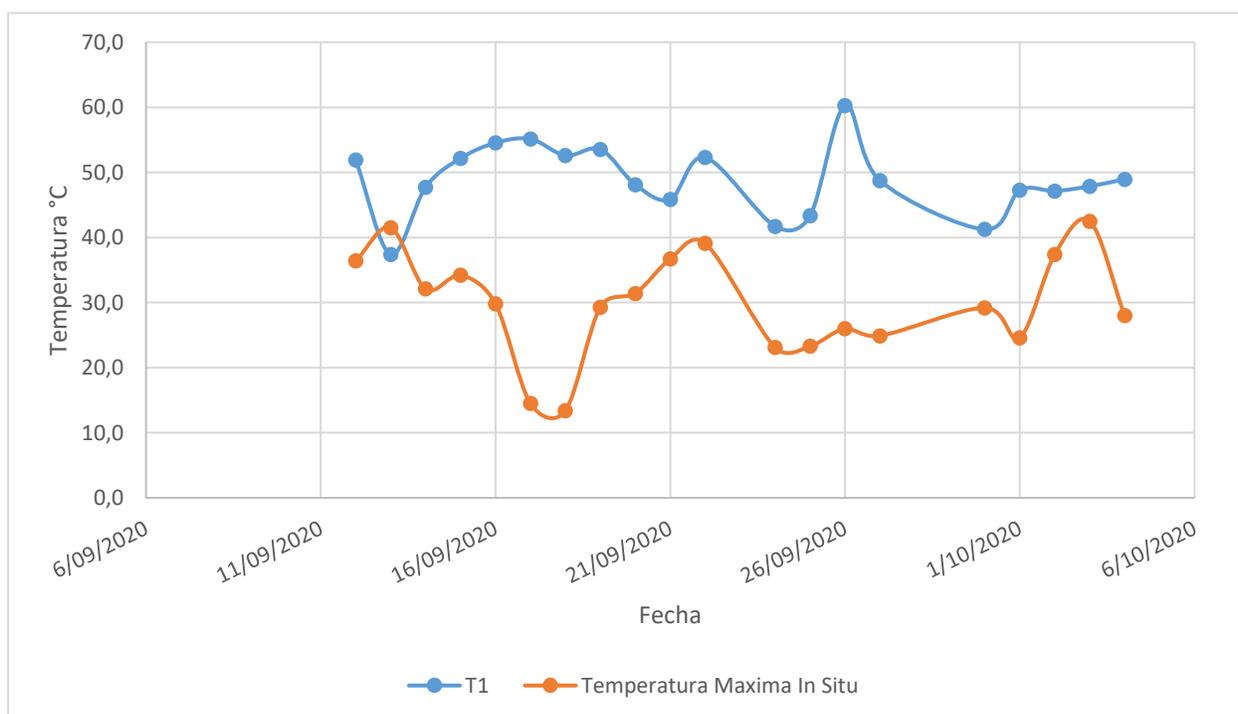


Figura 61 Comparación Temperatura Superficial T1 vs. In Situ PM Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia

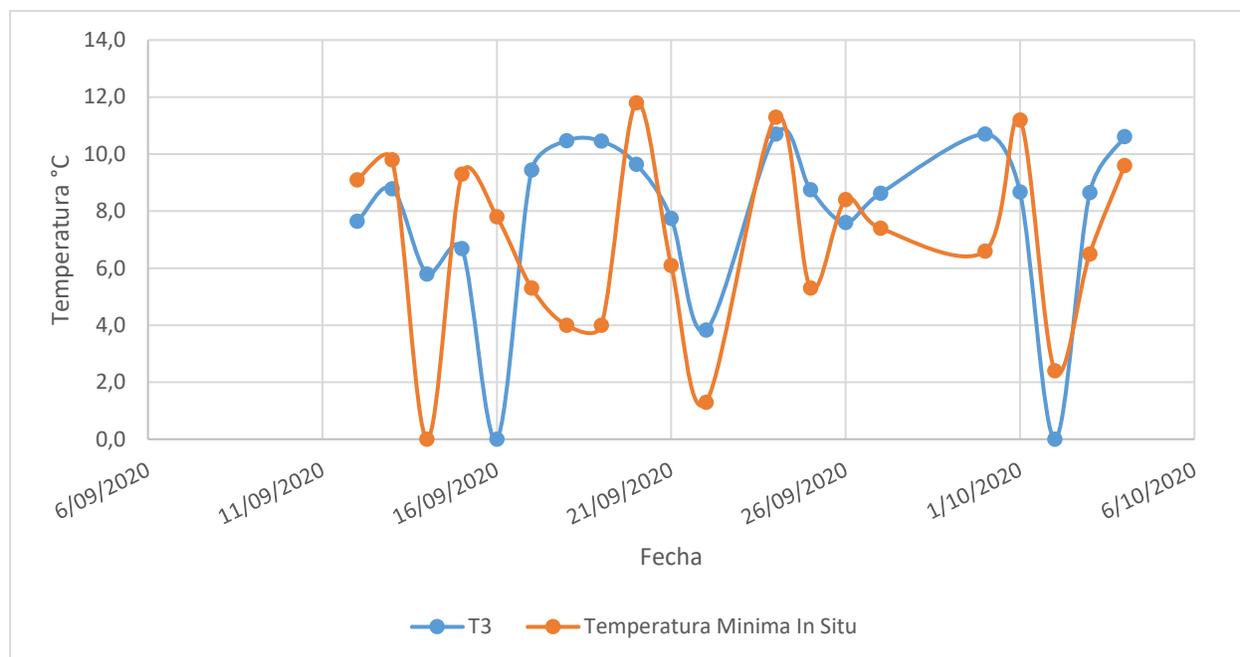


Figura 62 Comparación Temperatura Superficial T3 vs. In Situ AM Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia

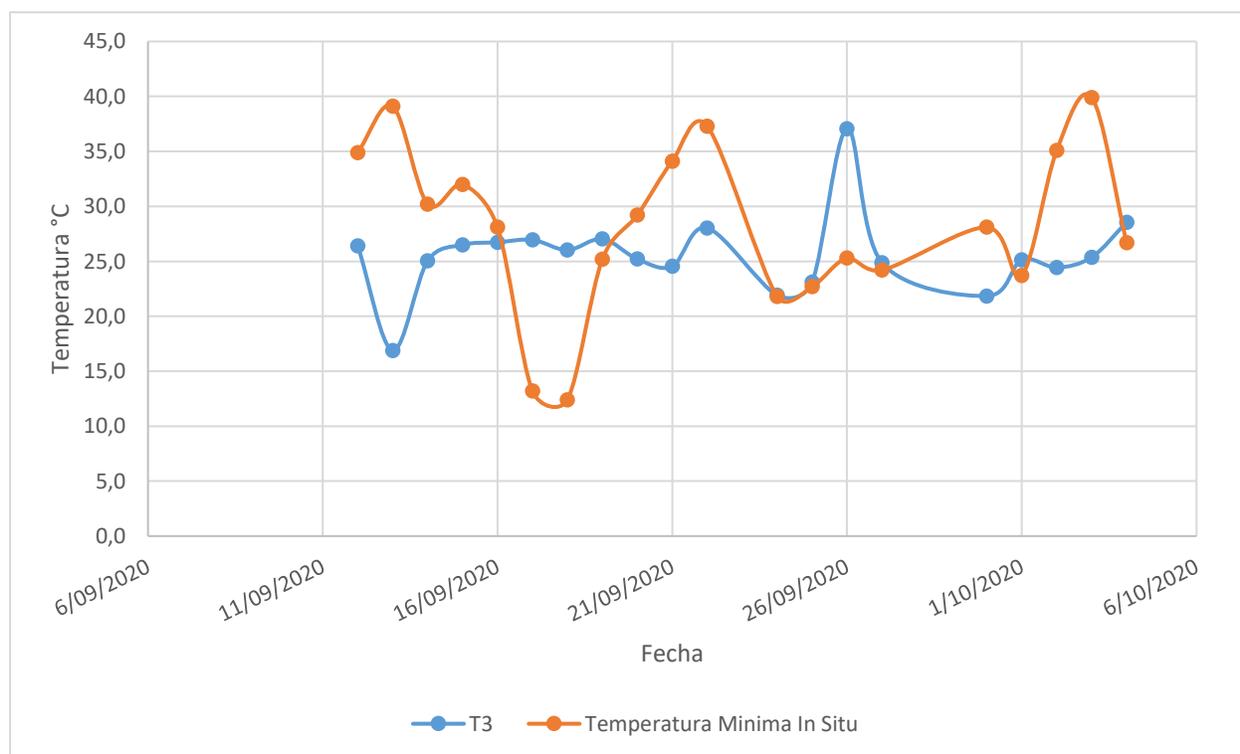


Figura 63 Comparación Temperatura Superficial T3 vs. In Situ PM Puente Av. Rojas con Calle 26. Elaboración Propia

Como se puede observar en la figura 60 y la figura 62 se exponen los resultados de las comparaciones de los datos tomados in situ con los datos obtenidos de la modelación numérica en el horario de la mañana de las temperaturas superiores e inferiores donde se puede ver similitud en algunos datos, cabe aclarar que los datos registrados en el puente Av. Rojas con Calle 26 son propensos a presentar variaciones por diversas razones, como pequeñas alteraciones en el horario de la toma de las fotografías y cambios inesperados del clima, a comparación de los valores de la modelación numérica los cuales son emitidos a nivel general para la ciudad de Bogotá.

8.2. Puente Siberia Cota

Se realizó el mismo proceso con las incógnitas T1 y T3 en el puente de Siberia Cota, determinando los valores de las temperaturas tanto de la parte superior como de la parte inferior de cada uno de los días en estudio, en la figura 64 y la figura 65 se puede observar el resultado del análisis.

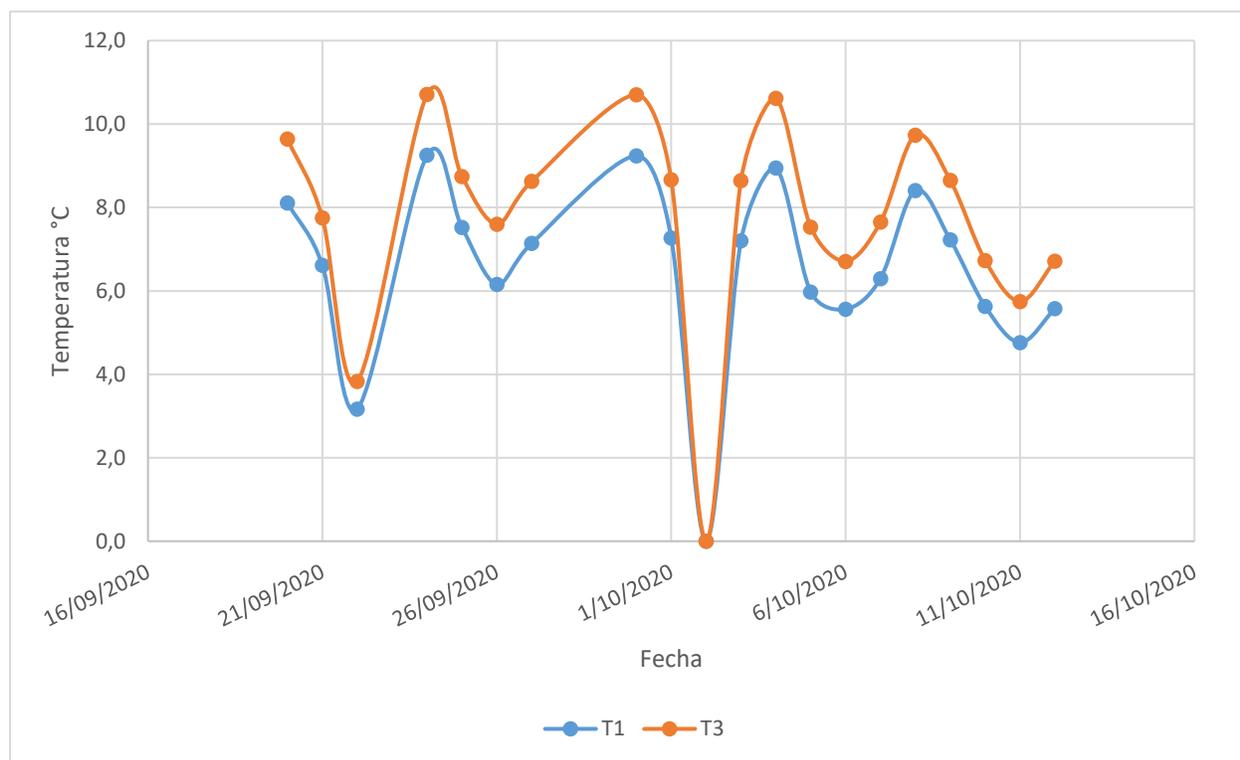


Figura 64 Temperatura Superficial de la Mañana Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.

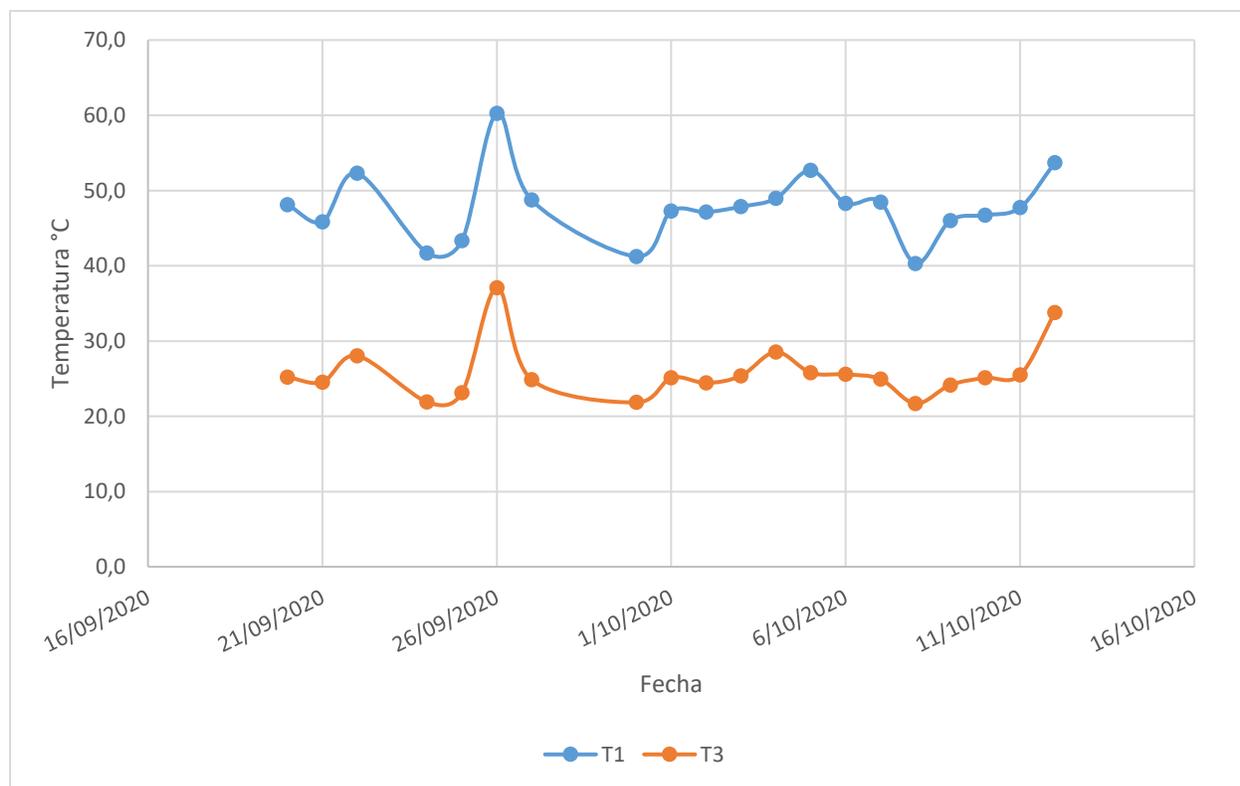


Figura 65 Temperatura Superficial de la Tarde Puente Siberia Cota. Elaboración Propia.

Como se evidencia en la figura 64 y figura 65 los resultados de la modelación numérica, los valores de T1 presentan una mayor variación respecto a los valores de T3, al realizar el análisis se observa que la variación de T1 durante el transcurso de los días del estudio estuvo en margen de los 0 °C a los 40°C, mientras que la variación presentada por T3 estuvo en un rango entre los 0 °C y los 60°C, lo cual infiere que esto se presenta porque T3 esta mayormente expuesto a la radiación solar durante el día, mientras que en la noche está a la deriva de otros factores como el viento.

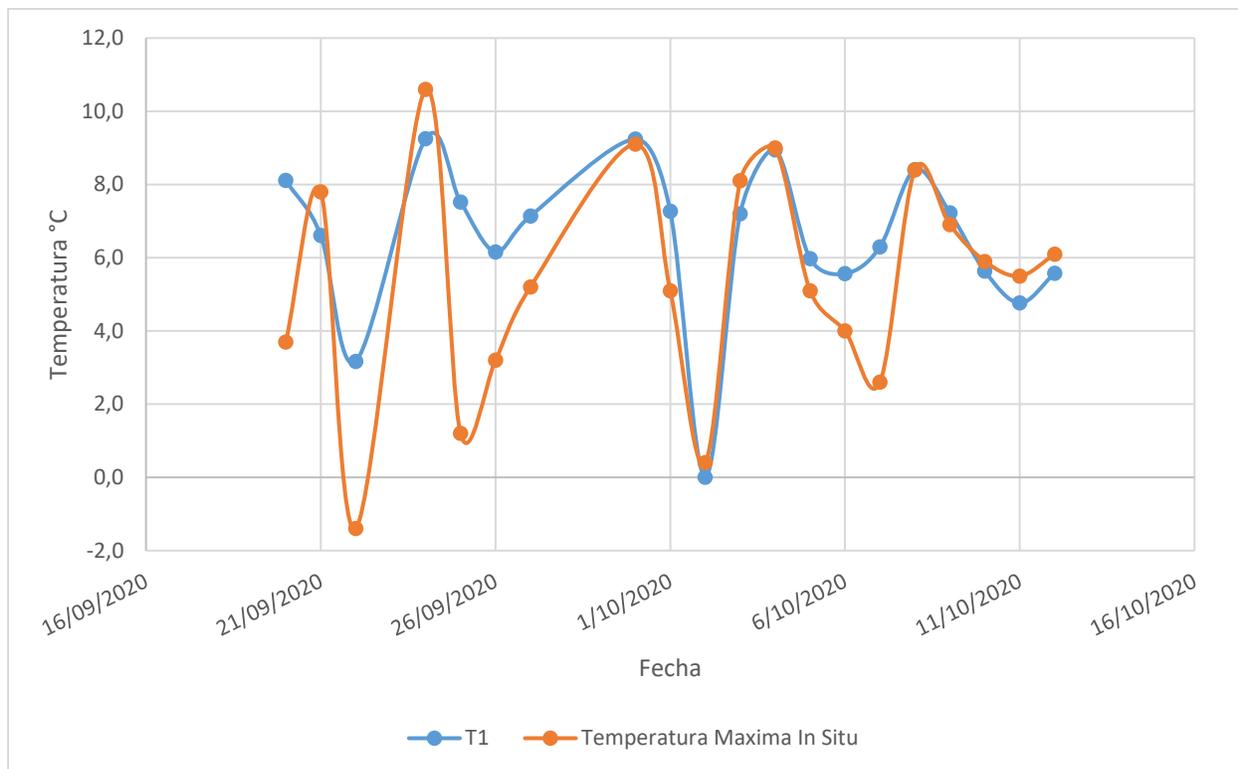


Figura 66 Comparación Temperatura Superficial T1 vs. In Situ AM Puente Siberia Cota. Elaboración Propia

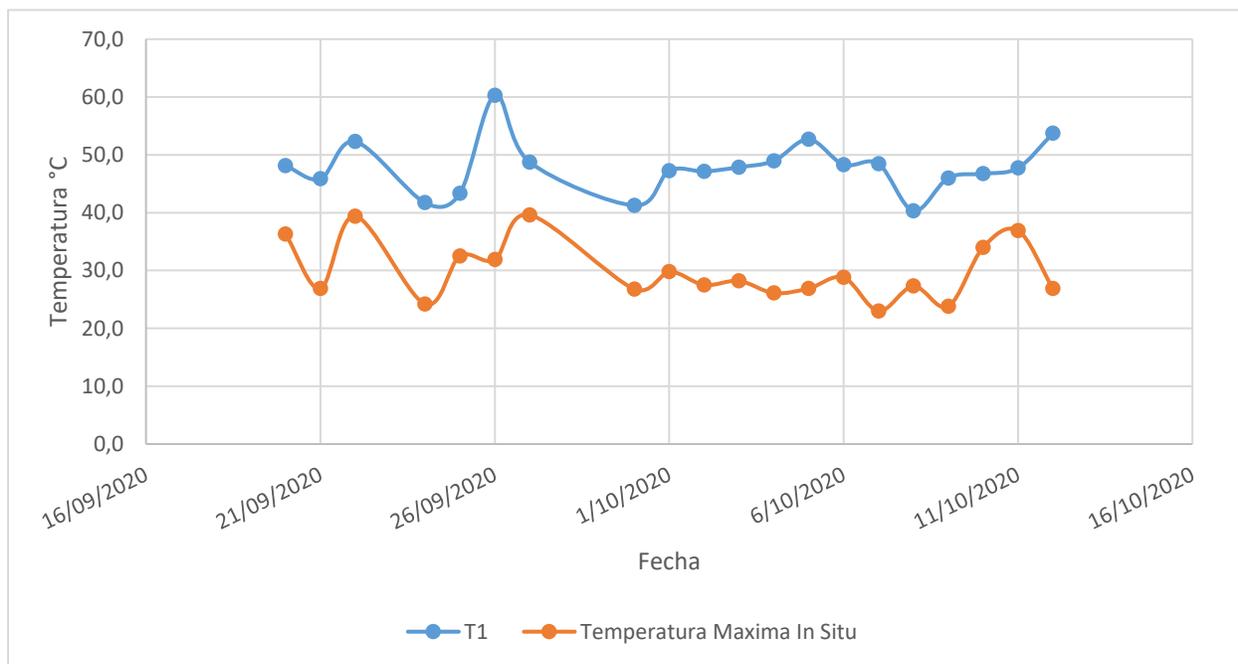


Figura 67 Comparación Temperatura Superficial T1 vs. In Situ PM Puente Siberia Cota. Elaboración Propia

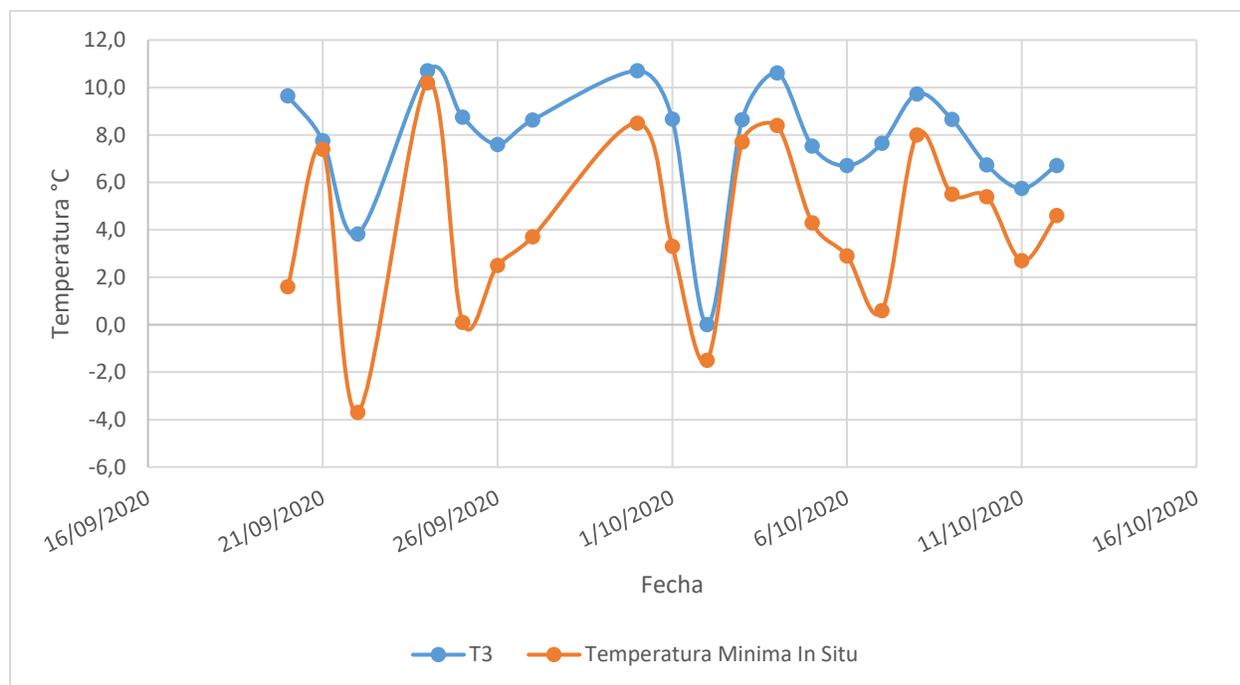


Figura 68 Comparación Temperatura Superficial T3 vs. In Situ AM Puente Siberia Cota. Elaboración Propia

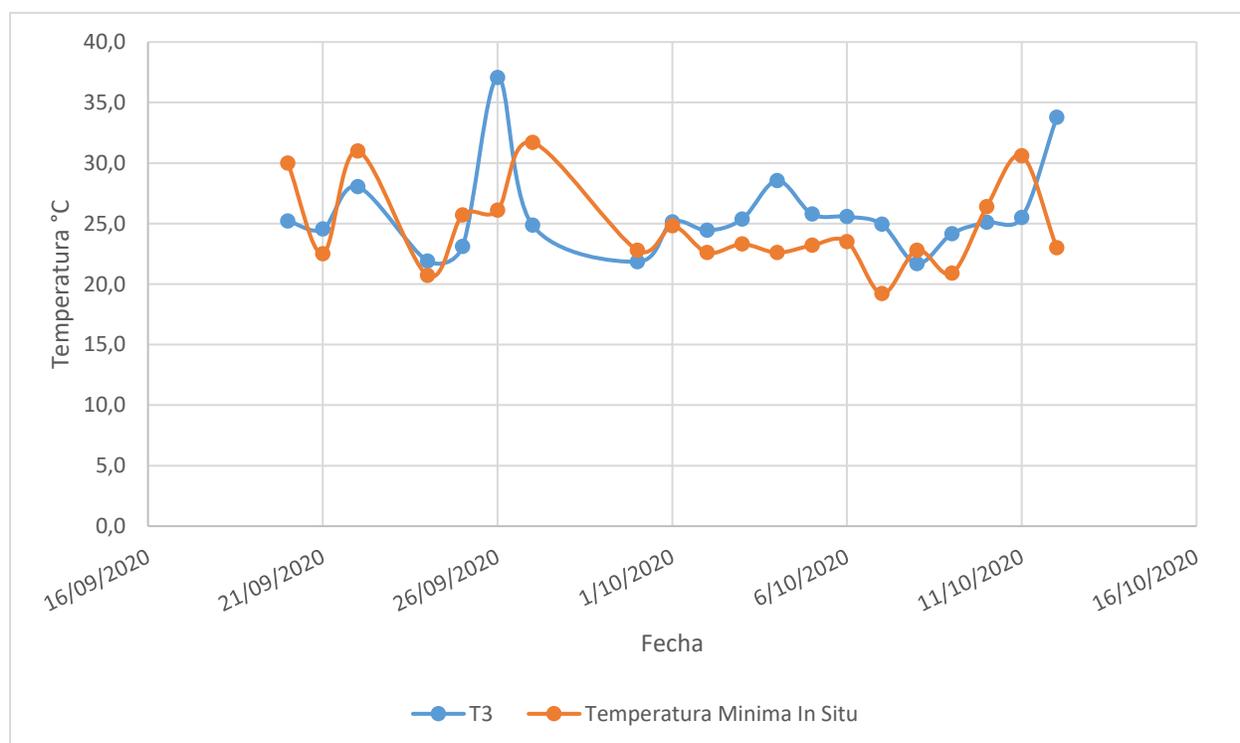


Figura 69 Comparación Temperatura Superficial T3 vs. In Situ PM Puente Siberia Cota. Elaboración Propia

Como se puede observar en la figura 66 los valores de la modelación numérica y los valores tomados en campo presenta similitud en los registros tanto de la estación meteorológica, como de los tomados en In situ teniendo temperaturas bajo cero como el 22 de septiembre donde evidencia un valor de $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, también se puede observar que durante el periodo de la toma de datos los registros siempre se mantuvieron igual o inferiores a los obtenidos en la modelación numérica.

8.3. Comparación de los puentes y discusión

Con base en los resultados obtenidos de los informes generados durante los 20 días en cada puente en el software FLIR TOOLS, se obtuvieron los datos de las temperaturas mínimas y las temperaturas máximas en el horario de la mañana y de la tarde como se puede apreciar en la figura 70, figura 71, figura 72, figura 73 y en la tabla 2.

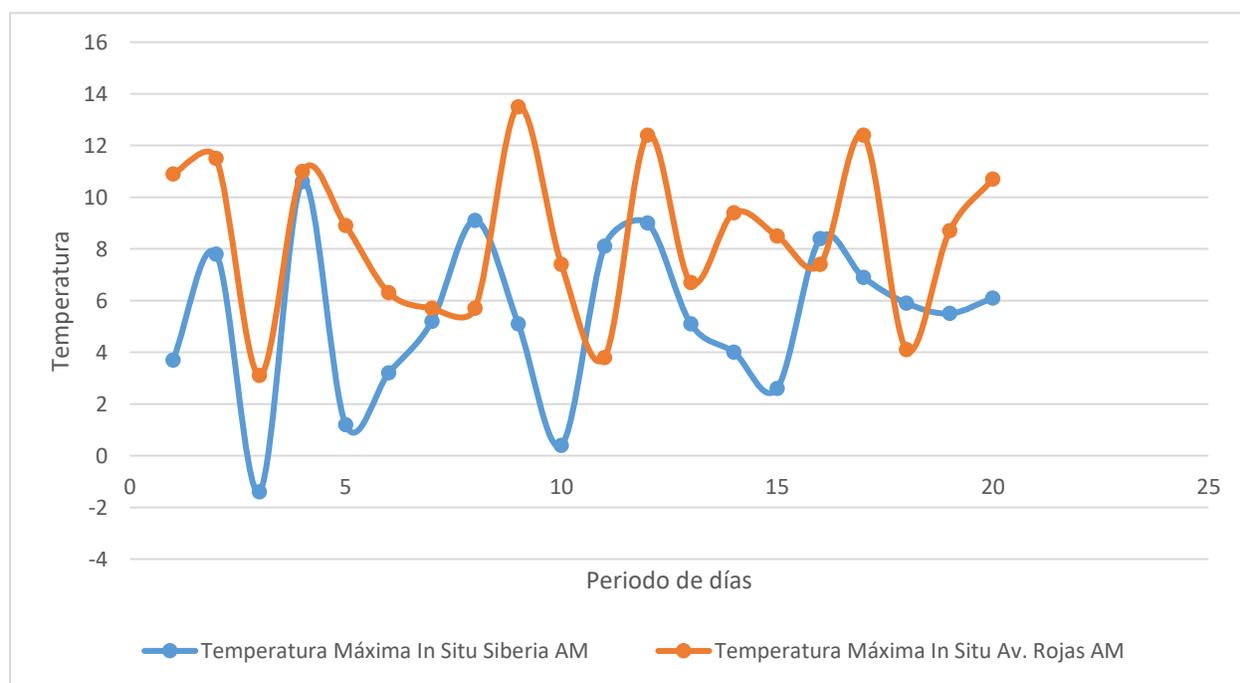


Figura 70 Comparación temperatura máxima In situ AM Puente Siberia vs. Puente Av. Roja con Calle 26

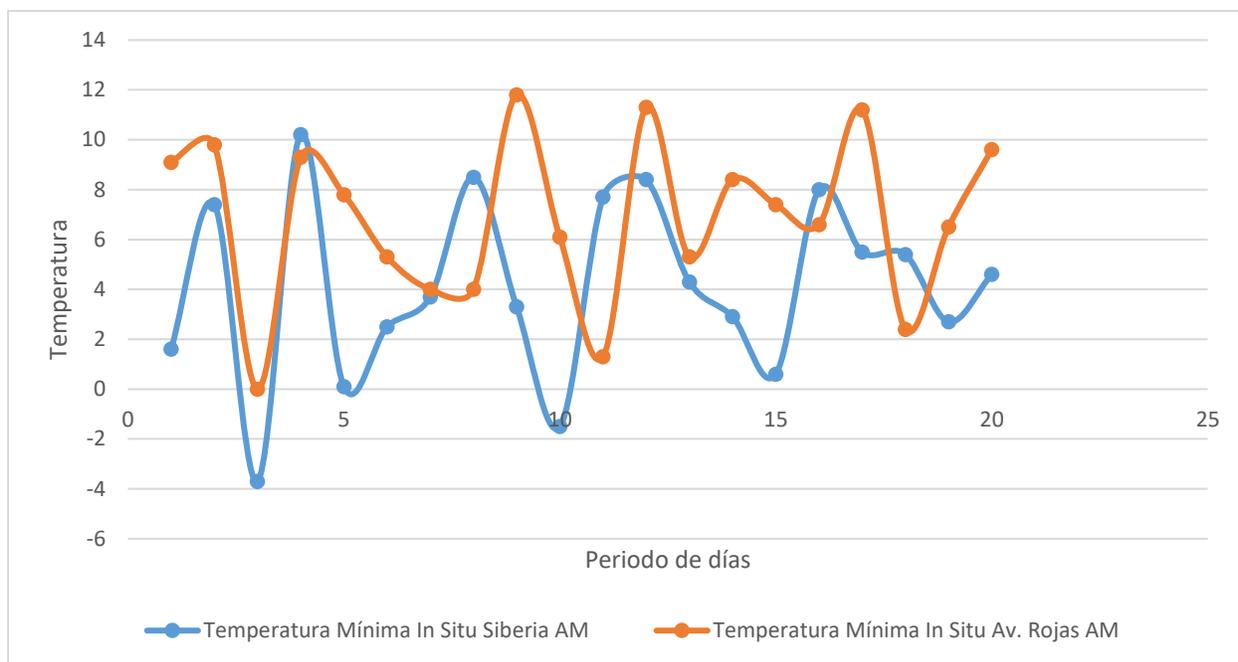


Figura 71 Comparación temperatura mínima In situ AM Puente Siberia vs. Puente Av. Roja con Calle 26

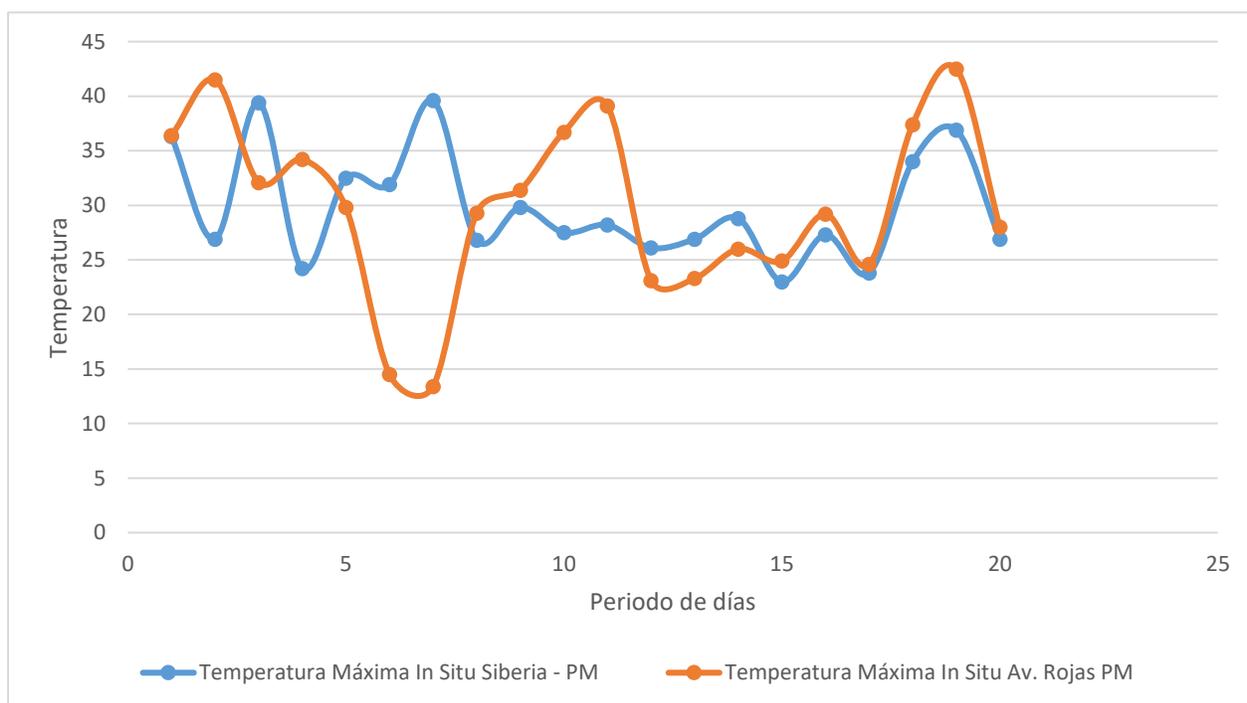


Figura 72 Comparación temperatura máxima In situ PM Puente Siberia vs. Puente Av. Roja con Calle 26

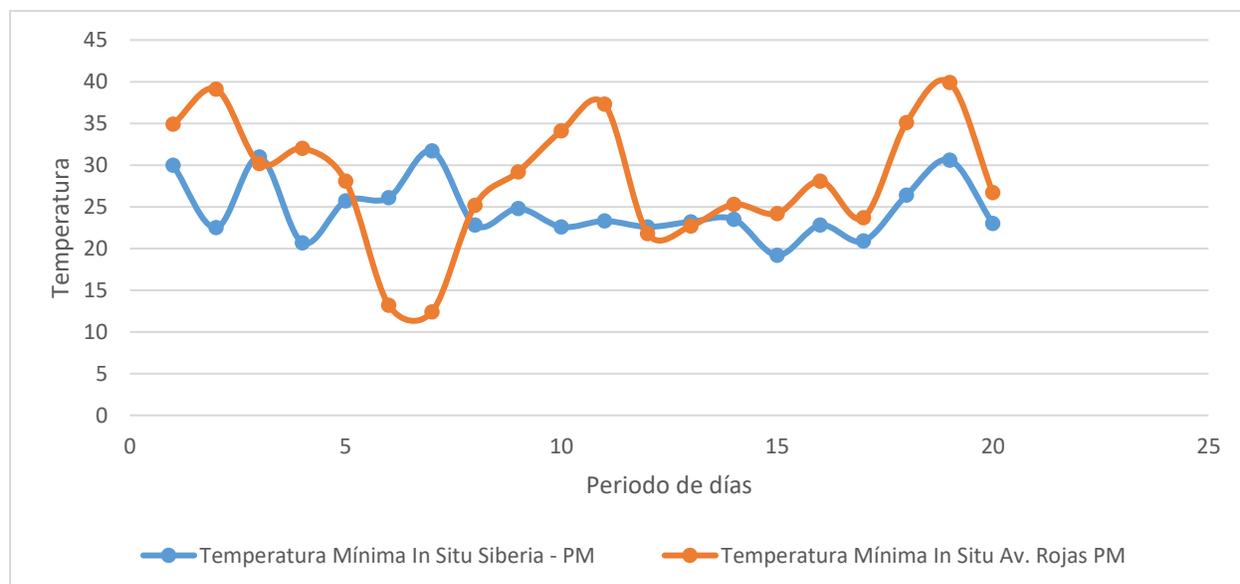


Figura 73 Comparación temperatura mínima In situ PM Puente Siberia vs. Puente Av. Roja con Calle 26

Tabla 2 Comparación temperaturas In situ. Elaboración propia

Puente	Temperatura máxima AM °C	Temperatura mínima AM °C	Temperatura máxima PM °C	Temperatura mínima PM °C
Siberia	10,6	-3,7	39,6	19,2
Av. Rojas con Calle 26	13,5	0	42,5	12,4

Realizando la comparación de las temperaturas máximas y mínimas del puente de Siberia y del puente de la Av. Rojas con calle 26 se puede evidenciar que las temperaturas registradas en el puente de Cota durante el periodo de toma de datos estuvieron por debajo de las temperaturas tomadas en el puente de Bogotá, como se puede observar en la tabla 2 las temperaturas obtenidas en Siberia fueron de $-3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la mañana y $39,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ como temperatura máxima en la tarde, mientras que en el puente de la Av. Rojas con calle 26 el valor más bajo registrado fue de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el más alto fue de $42,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, de igual manera se pudo apreciar que la diferencia de temperaturas entre los dos puentes en tres horarios no superó los 4°C , solamente en la temperatura mínima PM se presentó una diferencia de 7°C lo cual se pudo dar por las condiciones climáticas del momento.

Tabla 3 Comparación temperaturas por método de modelación. Elaboración propia

Puente	Temperatura máxima AM °C	Temperatura mínima AM °C	Temperatura máxima PM °C	Temperatura mínima PM °C
Siberia T1	9,3	0	60,3	40,3
Siberia T3	10,7	0	33,8	21,7
Av. Rojas con Calle 26 T1	9,3	0	60,3	37,4
Av. Rojas con Calle 26 T3	10,7	0	37,1	16,9

En la tabla 3 se puede evidenciar que mediante el modelo numérico que en horas de la mañana las temperaturas de T1 y T3 son semejantes en los dos puentes, por otra parte, el T1 en horas de la tarde solo presento variaciones en la temperatura mínima con una diferencia no mayor a 4°C, en cambio el T3 si presentó una variación de temperatura tanto en la máxima como en la mínima presentando una diferencia de 3° y 5° respectivamente.

8.4. Según la norma

Según la Norma colombiana de Diseño de Puentes en la sección 3 en el título 3.12 menciona los procedimientos que se deben tener en cuenta para el diseño de un puente los cuales no son obligatorios y se dejan a criterio del diseñador, por ejemplo en el Procedimiento A, que es el que históricamente se ha usado en el diseño de puentes, dice, que para tener en cuenta las especificaciones, lo primero que se debe determinar es el clima moderado con los días de congelamiento que se presenten en un año, si los días de congelamiento no superan los 14 se le considera un clima moderado, es pertinente tener en cuenta que se le considera un día de congelamiento aquel cuya temperatura promedio es inferior a los 0 °C, también es pertinente mencionar que estas temperaturas solo son tenidas en cuenta el algunos materiales como el aluminio, el acero, la madera y el concreto y estas no reconocen la presencia o ausencia de la carpeta asfáltica. Como se puede ver en la tabla 4.

Tabla 4 Intervalos de Temperatura Procedimiento A. Adaptado de: Norma Colombiana de Diseño de Puentes.

Clima	Acero o Aluminio	Concreto	Madera
Moderado	-18° a 49° C	-12° a 27°C	-12° a 24°C
Frio	-35° a 49°C	-18° a 27°C	-18° a 24°C

Por otra parte, en el procedimiento B no puede ser tenido en cuenta para los diseños en Colombia ya que este depende específicamente de mapas de calos los cuales en Colombia aun no es posible obtenerlos debido a que no están disponibles lo cual genera que se sigan utilizando los métodos tradicionales.

Con las características mencionadas en el procedimiento A y en el procedimiento B de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes al no tener en cuenta el análisis de los efectos del gradiente térmico en este elemento fundamental como lo es el asfalto en los tableros es posible que se puedan generar algunos daños como el agrietamiento, baches entre otros a largo plazo, así como se puede evidenciar en la figura 74 y figura 75 donde se observa a lo largo de la estructura que donde se une el tablero con el bordillo se presentan daños en la carpeta asfáltica los cuales es posible que sean generados a largo plazo por la influencia de la temperatura.



Figura 74 Puente Av. Rojas con Calle 26. Fuente Propia



Figura 75 Puente Av. Rojas con Calle 26. Fuente Propia

9. Conclusiones

Se cumplió a cabalidad el registro diario de la toma de datos en cada uno de los puentes con la cámara de referencia FLIR ONE PRO proporcionada por la Universidad Antonio Nariño, para realizar los respectivos informes de la variación de la temperatura en el software FLIR TOOLS para cada uno de los días.

Se realizó la modelación numérica de los datos obtenidos de la estación meteorológica El Dorado, de igual manera se desarrolló el análisis de los valores captados en los puentes en los horarios de la mañana y de la tarde, una vez conseguidos los resultados de los dos métodos mencionados anteriormente se compararon obteniendo resultados similares entre la modelación numérica y los datos de campo.

Dados los datos proporcionados por la estación meteorológica El Dorado para el análisis del puente de la Av. Rojas con Calle 26 el día que presentó una mayor temperatura fue el 03 de octubre con un valor de 20 °C en la estación meteorológica y un valor de 42,8 °C en el tablero del puente.

Dados los datos proporcionados por la estación meteorológica El Dorado para el análisis del puente de Siberia Cota el día que presentó una mayor temperatura fue el 22 de septiembre con un valor de 22 °C en la estación meteorológica y un valor de 39,4 °C en el tablero del puente.

Los datos de radiación solar con los que se realizó la modelación numérica en el periodo de estudio mostraron un valor máximo de 880 W/m² y un valor mínimo de 790 W/m² para el horario de la tarde, mientras que los valores de la mañana fueron 0 W/m², debido a que se obtuvieron de la página Weather Spark, no se relacionan datos de la plataforma GIOVANNI ya que esta presentó inconvenientes en el mes de septiembre y los datos de octubre aún no están disponibles.

Se puede inferir de la comparación de los valores de T1 y T3, que T1 presenta una mayor variación en las temperaturas que T3 en los tableros en los dos puentes, esto debido a que los tableros en horas de la tarde están directamente expuestos a la radiación solar alcanzando valores superiores a los 60 °C, mientras que en la mañana se evidenciaron valores bajo los 0 °C.

De los resultados obtenidos de los informes del Software FLIR TOOLS se puede evidenciar que el puente de Siberia durante el periodo de toma de datos siempre presento temperaturas más bajas que el puente de la Av. Rojas con Calle 26, alcanzando en horas de la mañana valores de -3,7 °C y en la tarde 39,6 °C, mientras que en el puente de Bogotá se obtuvieron registros de los 0°C en la mañana a los 42,5 °C en la tarde.

Basado en las especificaciones que da la Norma Colombiana de Diseño de Puentes se puede evidenciar que para la elaboración de estos proyectos no es obligatorio el tener en cuenta la influencia del gradiente térmico puesto que esto se deja a criterio y experiencia del diseñador.

Como se puede observar en la figura 74 y figura 75 se presentan algunos daños como la erosión del asfalto en la unión del tablero con el bordillo y la generación de baches en la carpeta asfáltica a lo largo del tablero los cuales es posible que hayan sido generados por la influencia que ha tenido el gradiente térmico al presentarse picos máximos y mínimos con el paso del tiempo.

10. Referencias Bibliograficas

Bridge Design| Temperature Effects in Bridge Decks. (n.d.). Retrieved April 1, 2020, from <http://bridgedesign.org.uk/tutorial/temperature-effects.php>

Sawicki, B., & Brühwiler, E. (2020). Long-term strain measurements of traffic and temperature effects on an RC bridge deck slab strengthened with an R-UHPFRC layer. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, *10*(2), 333–344.
<https://doi.org/10.1007/s13349-020-00387-3>

Puente | Construpedia, enciclopedia construcción. (n.d.). Retrieved April 26, 2020, from <https://www.construmatica.com/construpedia/Puente>

FISICA UNIVERSITARIA - Francis Weston Sears - Google Libros. (n.d.). Retrieved April 26, 2020, from https://books.google.com.co/books?id=rHeGgg26AIC&printsec=frontcover&dq=fisica+universitaria&hl=es419&sa=X&ved=0ahUKEwiqt8ymvYfpAhWEgAKHQIKAGAQ6AEIMDAB#v=one_page&q=fisica+universitaria&f=false

Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). Transferencia de calor en configuraciones comunes. In

Transferencia de calor y masa (pp. 179–181).

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2012). *AASHTO LRFD bridge design specifications, customary U.S. units*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

(Definición de Puente» Concepto en Definición ABC, n.d.) *Definición de Puente» Concepto en Definición ABC.* (n.d.). Retrieved May 19, 2020, from <https://www.definicionabc.com/tecnologia/puente.php>

Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP14. (n.d.). Retrieved April 1, 2020, from <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/3709-norma-colombiana-de-diseno-de-puentes-ccp14>

(*Durabilidad de los pavimentos de hormigón asfáltico de puentes bajo cargas de temperatura - IOPscience*, n.d.) *Durabilidad de los pavimentos de hormigón asfáltico de puentes bajo cargas de temperatura - IOPscience*. (n.d.). Retrieved May 19, 2020, from <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/786/1/012032>

(Dan et al., 2019) Dan, H.-C., Tan, J.-W., & Chen, J.-Q. (2019).

Temperature distribution of asphalt bridge deck pavement with groundwater circulation temperature control system under high- and low-temperature conditions. *Road Materials and Pavement Design*, 20(3), 509–527.
<https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1397048>

(Alejos, n.d.)Alejos, J. M. (n.d.). *Libro de Puentes AASHTO*. Retrieved October 31, 2020, from https://www.academia.edu/11331657/Libro_de_Puentes_AASHTO

Bogotá, Colombia Weather History | Weather Underground. (n.d.). Retrieved November 1, 2020, from <https://www.wunderground.com/history/monthly/co/bogotá/SKBO/date/2020-9>

Lopez, J. R. P. (n.d.). Libro- Introducción al diseño de puentes. Retrieved October 31, 2020, from https://www.academia.edu/34822576/Libro_Introducción_al_diseño_de_puentes

LTDA., C. (1997). Planos de diseño.
<http://webidu.idu.gov.co/jspui/handle/123456789/78941>

Scopus - Document search. (n.d.). Retrieved November 6, 2020, from <https://ezproxy.uan.edu.co:2063/search/form.uri?display=basic>

Termodinamica_y_Cinetica_Quimica.pdf - Google Drive. (n.d.). Retrieved October 31, 2020, from <https://drive.google.com/file/d/1159NmfmHQoClkxUVbek1iyAf0SS8zRxp/view>

LTDA., C. (1997). Planos de diseño.
<http://webidu.idu.gov.co/jspui/handle/123456789/78941>

(Termodinamica_y_Cinetica_Quimica.pdf - Google Drive, n.d.) Alejos, J. M. (n.d.). *Libro de Puentes AASHTO*. Retrieved October 31, 2020, from https://www.academia.edu/11331657/Libro_de_Puentes_AASHTO

from

<https://drive.google.com/file/d/1159NmfmHQoClkxuVbek1iyAf0SS8zRxp/view>

(Dan et al., 2019) Dan, H.-C., Tan, J.-W., & Chen, J.-Q. (2019). Temperature distribution of asphalt bridge deck pavement with groundwater circulation temperature control system under high- and low-temperature conditions. *Road Materials and Pavement Design*, 20(3), 509–527. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1397048>