UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA

MAESTRÍA EN CIENCIAS DEL AGUA

TESIS

ANÁLISIS DE DISPERSIÓN DE LA PLUMA TÉRMICA DE LA CENTRAL NUCLEOELÉCTRICA LAGUNA VERDE MEDIANTE TELEDETECCIÓN.

Presenta

ING. RAUDEL GARCÍA DÍAZ

Dirigido por:

DR. CARLOS ALBERTO MASTACHI LOZA

DR. HERMILO RAMÍREZ LEÓN

Toluca, México; noviembre de 2020

RESUMEN

En la actualidad, los cuerpos de agua costeros han sido objeto de alteraciones en sus características fisicoquímica, principalmente han estado expuestos a variaciones de temperaturas provocadas por las descargas de aguas residuales en los procesos de enfriamientos de reactores nucleares en plantas nucleoeléctricas. El estudio y monitoreo de las variaciones térmicas, así como las características espaciotemporales de las mismas, han sido objeto de estudio de muchas investigaciones científicas y han definido el fenómeno como penacho o pluma térmica. La utilización adecuada de técnicas de teledetección permite el monitoreo y el análisis de la dispersión de la pluma térmica en cuanto a sus características espaciotemporales, así como la determinación de procesos de recirculación hacia la obra de toma, lo cual no es operativamente correcto. La presente investigación se realizó en el período 2013-2019 en la central nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV) ubicada en Punta Limón en la costa este de México, Estado de Veracruz, municipio de Alto Lucero de Gutiérrez Barrios. El objetivo fue caracterizar la forma, dimensión y dirección de la dispersión de la pluma térmica utilizando un algoritmo ajustable para el cálculo de la temperatura superficial del mar (TsM) a través de imágenes satelitales Landsat-8. Para la obtención de las imágenes satelitales de utilizaron los datos proporcionados por el sensor infrarrojo térmico del satélite Landsat-8, específicamente los de la banda 10; mientras que los datos in situ fueron proporcionados por la SEMAR. Se realizó un preprocesamiento a las imágenes obtenidas según el manual del usuario de Landsat-8 y posteriormente se determinó la TsM utilizando la ecuación de Plank modificada. Se realizó un proceso de calibración donde se obtuvo un coeficiente de emisividad de la superficie óptimo de 0.966. En cuanto al proceso de validación que se realizó entre los datos modelados y los datos observados se obtuvo un error cuadrático medio y un sesgo de 1.18°C y 0.01°C respectivamente. También se observó una estrecha relación y una fuerte correlación circular (0.969) entre las variables dirección de la dispersión de las plumas térmicas y las corrientes marinas simuladas en el HYCOM. El proceso de recirculación de las isotermas que conforman las plumas térmicas hacia la obra de toma se observó en 52 imágenes (77%), de las cuales el 48% de las plumas térmicas inciden con isotermas de altas temperaturas que oscilan en un rango de 29.0°C a 31.0°C.

Palabras clave: pluma térmica, Landsat-8, ecuación de Plank, recirculación, corrientes marinas, HYCOM.

SUMMARY

Nowadays, the coastal bodies of water have seen alterations in their physicochemical characteristics. Mainly, they have been exposed to temperature variations caused by the discharge of residual waters as part of the cooling process of reactors in nuclear power plants. The study and monitoring of the various thermal variations like their spacetime characteristics, have been subjects of study in many scientific investigations and have defined the phenomenon as thermal plume. The adequate utilization of remote sensing techniques allows the monitoring and analysis of the dispersion of thermal plumes regarding their spacetime characteristics, like the determination of recirculation processes towards the objective of this paper, which is not operationally correct. The cited investigation was done in the period 2013-2019 in the Laguna Verde nuclear power plant (LVNPP) in Punta Limon in the east coast of Mexico, Estado de Veracruz, municipality of Alto Lucero de Gutierrez Barrios. The objective was to characterize the shape, dimension, and direction of the spread of thermal plumes utilizing an algorithm adjusted to calculate the sea surface temperature (SST) via satellite images Landsat-8. For the gathering of the satellite images, we used the data provided by the thermal infrared sensor from the satellite Landsat-8, specifically those from band 10. The data in situ were provided by SEMAR. Image preprocessing was done following the user manual of the Landsat-8 and the SST was determined using a modified version of Planck's equation. A process of calibration was done where an optimum emissivity coefficient of 0.966 was obtained. As far as the process of validation that was done between the modeled and the observed data, a root mean square error and a bias of +/- 1.18°C and 0.01°C were obtained, respectively. A close relationship and a strong circular correlation of (0.969) were observed between the direction of the dispersion of the thermal plumes and the sea currents simulated in the HYCOM. The process of recirculation of the isotherms that make up thermal plumes towards the point of this paper were observed in 52 images (77%), in which 48% of the thermal plumes coincided with isotherms of high temperatures that oscillated in the range of 29.0°C to 31.0°C.

Keywords: thermal plume, Landsat-8, Planck's equation, recirculation, sea currents, HYCOM.

Contenido

1. **INTRODUCCIÓN** 1

2. **MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES** 3

2.1. **MARCO TEÓRICO** 3

2.1.1. Teledetección 3

2.1.2. Satélites LANDSAT 5

2.1.3. Contaminación Térmica 6

2.1.4. Plumas Térmicas o Penacho Térmico. 7

2.2. **ANTECEDENTES** 7

2.2.1. Contexto de estudio (Teledetección) 7

2.2.2. Contexto en la zona de estudio (Métodos numéricos) 13

3. **JUSTIFICACIÓN CONTEXTUAL Y CIENTÍFICA** 16

4. **HIPÓTESIS** 17

5. **OBJETIVOS** 18

5.1. Objetivo general 18

5.2. Objetivos específicos 18

6. **METODOLOGÍA** 19

6.1. Zona de estudio 19

6.2. Determinación de la pluma térmica (Landsat-8) 20

6.2.1. Descarga de insumos para la investigación 21

6.2.2. Preprocesamiento de los datos 22

6.2.3. Determinación de TsM 24

7. **RESULTADOS Y DISCUSIÓN** 29

7.1. Calibración y Validación con los datos in situ 29

7.2. Resultados de la investigación 32

7.2.1. Resultados generales del período 2013-2019. 32

7.2.2. Análisis estadístico de los resultados generales del período 2013-2019. 36

7.2.3. Plumas térmicas y parámetros geométricos estadísticos obtenidos como resultado del modelo. 43

7.2.4. Relación entre la dirección de la dispersión de las plumas térmicas y las corrientes marinas. 84

7.2.5. Análisis Direccional 125

8. **CONCLUSIONES** 128

9. **RECOMENDACIONES** 129
10. **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS** 130
11. **ANEXOS**.....137

LISTA DE ACRÓNIMOS

A	Altas
ADC	Análisis Direccional Circular
AF	Atmospheric Functions
ANOVA	Analysis of Variance
AVHRR	Advanced Very High-Resolution Radiometer
B	Bajas
CC	Correlación Circular
CNDB	Central Nucleoeléctrica Daya Bay
CNLV	Central Nucleoeléctrica Laguna Verde
CVT	Constant Variance Test
D	Directas
DWD	Servicio Meteorológico Nacional de Alemania
ECM	Error Cuadrático Medio
ET	Evapotranspiración
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
GDM	Golfo de México
GODAE	Global Ocean Data Assimilation Experiment
GT	Gradiente Térmico
HYCOM	Hybrid Coordinate Ocean Model
I	Indirectas
ISO	Isoterma
ISOs	Isotermas
LST	Land Surface Temperature
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MODTRAN	Moderate Resolution Atmospheric Transmission
MT	Mapeador Temático
MW	Mono Window
OT	Obra de Toma
PNE	Plantas Nucleoeléctricas
PsTs	Plumas Térmicas
PT	Pluma Térmica
RMSE	Root Mean Squared Error
S	Sesgo
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SEMAR	Secretaría de Marina
SIG	Sistemas de Información Geográfica
STD	Standard Deviation
SW	Split Window
TAM	Temperatura Ambiente del Mar
TIR	Thermal Infrared Sensor
TOA	Top of Atmosphere
USGS	United States Geological Survey
WST	Water Surface Temperature
ZD	Zona de Descarga

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características técnicas del LANDSAT-8 6
Tabla 2. Condiciones iniciales y de fronteras consideradas en el estudio (Jiménez, H. & Botello, A., 1996). 14
Tabla 3. Simbología utilizada en los flujogramas de las etapas y/o procesos. 22
Tabla 4. Factores de reescalamiento de los metadatos a utilizar para la Radiancia. 24
Tabla 5. Constantes K1 y K2 para los satélites Landsat-5, Landsat-7 y Landsat 8. 26
Tabla 6. Constantes utilizadas para la determinación de Rc. 26
Tabla 7. Tabla resumen asociada a las características de las PT en el período 2013-2019. 32
Tabla 8. Clasificación definida para las PsTs en cuanto a la circulación y la intensidad de las ISOs. 34
Tabla 9. Tabla resumen general asociada a las temperaturas modeladas, diferenciales y GT de las PsTs. 34
Tabla 10. Regresiones lineales y principales coeficientes de regresión 38
Tabla 11. Análisis de varianzas de las comparaciones realizadas. 39
Tabla 12. Principales coeficientes de la regresión exponencial (Área vs Longitud PT). 40
Tabla 13. Análisis de varianza (Área PT vs Longitud PT) 41
Tabla 14. Principales coeficientes de la regresión lineal (Dirección PT vs Dirección CM.) 41
Tabla 15. Análisis de varianza (Dirección PT vs Dirección CM). 42
Tabla 16. Relación entre la dirección de la dispersión de las PsTs y la dirección de las CM, Año 2013. 88
Tabla 17. Relación entre la dirección de la dispersión de las PsTs y la dirección de las CM, Año 2014. 93
Tabla 18. Relación entre la dirección de la dispersión de las PsTs y la dirección de las CM, Año 2015. 97
Tabla 19. Relación entre la dirección de la dispersión de las PsTs y la dirección de las CM, Año 2016. 105
Tabla 20. Relación entre la dirección de la dispersión de las PsTs y la dirección de las CM, Año 2017. 112
Tabla 21. Relación entre la dirección de la dispersión de las PsTs y la dirección de las CM, Año 2018. 120
Tabla 22. Relación entre la dirección de la dispersión de las PsTs y la dirección de las CM, Año 2019. 125
Tabla 23. Correlación circular entre la dirección de las PsTs y la dirección de las CM. 125
Tabla 24. Resultados obtenidos del ADC de la dirección de la dispersión de las PsTs. 127
Tabla 25. Resultados obtenidos del Análisis Direccional Circular de la dirección de las corrientes marinas. .127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Formas de Teledetección (Izquierda) y Componentes de un Sistema de Teledetección (Derecha). 3

Figura 2. Espectro Electromagnético. 5

Figura 3. Pluma térmica de la CNLV obtenida con el modelo de Stolzenbach-Harleman en 1993 por (Jiménez, H. & Botello, A., 1996). 14

Figura 4. Resultados obtenidos en (2006) y reportadas en (Ramírez-León et al., 2013). 15

Figura 5. Sondas SEMAR, ubicación geográfica y partes de la CNLV. 19

Figura 6. Flujograma general de la metodología. 21

Figura 7. Flujograma metodológico utilizado para la determinación de la TsM 23

Figura 8. Parámetros Geométricos de la Pluma Térmica. 27

Figura 9. Regresión Lineal General. 29

Figura 10. Sesgo, ECM y errores puntuales del 4 de mayo de 2018 utilizada en la validación. 30

Figura 11. Sesgo, ECM y errores puntuales del 20 de mayo de 2018 utilizada en la validación. 31

Figura 12. Comportamiento de la TsM en la OT, ZD, ISO mínima de la PT y TAM en el período 2013-2019 37

Figura 13. Regresiones lineales de la OT versus ZD, TAM, ISO mínima de las PsTs y los rangos térmicos asociados. 38

Figura 14. Regresión exponencial entre el área y la longitud de la pluma térmica. 40

Figura 15. Regresión lineal entre la dirección de dispersión de las PT y la dirección de las CM. 42

Figura 16. Características de la Pluma Térmica obtenida el 22 de mayo del 2013. 44

Figura 17. Características de la Pluma Térmica obtenida el 7 de junio del 2013. 44

Figura 18. Características de la Pluma Térmica obtenida el 25 de julio del 2013. 45

Figura 19. Características de la Pluma Térmica obtenida el 13 octubre del 2013. 45

Figura 20. Características de la Pluma Térmica obtenida el 29 de agosto del 2014. 46

Figura 21. Características de la Pluma Térmica obtenida el 13 de agosto del 2014. 47

Figura 22. Características de la Pluma Térmica obtenida el 2 de febrero del 2014. 47

Figura 23. Características de la Pluma Térmica obtenida el 23 de abril del 2014. 48

Figura 24. Características de la Pluma Térmica obtenida el 19 de diciembre del 2014. 48

Figura 25. Características de la Pluma Térmica obtenida el 28 de julio del 2014. 49

Figura 26. Características de la Pluma Térmica obtenida el 3 de diciembre del 2014. 49

Figura 27. Características de la Pluma Térmica obtenida el 18 de febrero del 2014. 50

Figura 28. Características de la Pluma Térmica obtenida el 22 de marzo del 2014. 51

Figura 29. Características de la Pluma Térmica obtenida el 3 de octubre del 2015. 52

Figura 30. Características de la Pluma Térmica del 4 de noviembre del 2015. 53

Figura 31. Características de la Pluma Térmica obtenida el 29 de junio del 2015. 53

Figura 32. Características de la Pluma Térmica obtenida el 15 de julio de 2015. 54

Figura 33. Características de la Pluma Térmica obtenida el 17 de septiembre del 2015. ..... *54*
Figura 34. Características de la Pluma Térmica obtenida el 6 de diciembre de 2015. ..... *55*
Figura 35. Características de la Pluma Térmica obtenida el 31 de julio del 2015. ..... *56*
Figura 36. Características de la Pluma Térmica obtenida el 21 de octubre del 2016. ..... *57*
Figura 37. Características de la Pluma Térmica obtenida el 30 de mayo del 2016. ..... *57*
Figura 38. Características de la Pluma Térmica obtenida el 7 de enero del 2016. ..... *58*
Figura 39. Características de la Pluma Térmica obtenida el 23 de enero del 2016. ..... *58*
Figura 40. Características de la Pluma Térmica obtenida el 14 de mayo del 2016. ..... *59*
Figura 41. Características de la Pluma Térmica obtenida el 17 de julio del 2016. ..... *59*
Figura 42. Características de la Pluma Térmica obtenida el 6 de noviembre del 2016. ..... *60*
Figura 43. Características de la Pluma Térmica obtenida el 8 de diciembre del 2016. ..... *60*
Figura 44. Características de la Pluma Térmica obtenida el 1 de julio del 2016. ..... *61*
Figura 45. Características de la Pluma Térmica obtenida el 18 de agosto del 2016. ..... *61*
Figura 46. Características de la Pluma Térmica obtenida el 5 de octubre del 2016. ..... *62*
Figura 47. Características de la Pluma Térmica obtenida el 22 de noviembre del 2016. ..... *62*
Figura 48. Características de la Pluma Térmica obtenida el 24 de diciembre del 2016. ..... *63*
Figura 49. Características de la Pluma Térmica obtenida el 27 de marzo del 2016. ..... *63*
Figura 50. Características de la Pluma Térmica obtenida el 19 de septiembre del 2016. ..... *64*
Figura 51. Características de la Pluma Térmica obtenida el 28 de abril del 2016. ..... *65*
Figura 52. Características de la Pluma Térmica obtenida el 12 de abril del 2016. ..... *65*
Figura 53. Características de la Pluma Térmica obtenida el 1 de mayo del 2017. ..... *66*
Figura 54. Características de la Pluma Térmica obtenida el 4 de julio del 2017. ..... *67*
Figura 55. Características de la Pluma Térmica obtenida el 18 de junio del 2017. ..... *67*
Figura 56. Características de la Pluma Térmica obtenida el 26 de febrero del 2017. ..... *68*
Figura 57. Características de la Pluma Térmica obtenida el 30 de marzo del 2017. ..... *69*
Figura 58. Características de la Pluma Térmica obtenida el 15 de abril del 2017. ..... *69*
Figura 59. Características de la Pluma Térmica obtenida el 8 de octubre del 2017. ..... *70*
Figura 60. Características de la Pluma Térmica obtenida el 25 de enero del 2017. ..... *70*
Figura 61. Características de la Pluma Térmica obtenida el 17 de mayo de 2017. ..... *71*
Figura 62. Características de la Pluma Térmica obtenida el 2 de abril del 2018. ..... *72*
Figura 63. Características de la Pluma Térmica obtenida el 17 de marzo del 2018. ..... *72*
Figura 64. Características de la Pluma Térmica obtenida el 8 de agosto del 2018. ..... *73*
Figura 65. Características de la Pluma Térmica obtenida el 20 de mayo del 2018. ..... *73*
Figura 66. Características de la Pluma Térmica obtenida el 18 de abril del 2018. ..... *74*
Figura 67. Características de la Pluma Térmica obtenida el 4 de mayo del 2018. ..... *75*

Figura 68. Características de la Pluma Térmica obtenida el 5 de junio del 2018. ..... *75*
Figura 69. Características de la Pluma Térmica obtenida el 25 de septiembre del 2018. ..... *76*
Figura 70. Características de la Pluma Térmica obtenida el 12 de noviembre del 2018. ..... *76*
Figura 71. Características de la Pluma Térmica obtenida el 30 de diciembre del 2018. ..... *77*
Figura 72. Características de la Pluma Térmica obtenida el 1 de marzo del 2018. ..... *77*
Figura 73. Características de la Pluma Térmica obtenida el 23 de julio del 2018. ..... *78*
Figura 74. Características de la Pluma Térmica obtenida el 9 de septiembre del 2018. ..... *78*
Figura 75. Características de la Pluma Térmica obtenida el 24 de agosto del 2018. ..... *79*
Figura 76. Características de la Pluma Térmica obtenida el 31 de enero del 2019. ..... *80*
Figura 77. Características de la Pluma Térmica obtenida el 7 de mayo del 2019. ..... *80*
Figura 78. Características de la Pluma Térmica obtenida el 8 de junio del 2019. ..... *81*
Figura 79. Características de la Pluma Térmica obtenida el 24 de junio del 2019. ..... *81*
Figura 80. Características de la Pluma Térmica obtenida el 16 de febrero del 2019. ..... *82*
Figura 81. Características de la Pluma Térmica obtenida el 10 de julio del 2019. ..... *82*
Figura 82. Características de la Pluma Térmica obtenida el 23 de mayo del 2019. ..... *83*
Figura 83. Características de la Pluma Térmica obtenida el 21 de abril del 2019. ..... *84*
Figura 84. Relación existente entre las CM del 5 de mayo del 2013 y la PT del 22 de mayo del 2013. ..... *86*
Figura 85. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 25 de julio del 2013. ..... *86*
Figura 86. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 13 de octubre del 2013. ..... *87*
Figura 87. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 7 de junio del 2013. ..... *87*
Figura 88. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 2 de febrero del 2014. ..... *88*
Figura 89. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 18 de febrero del 2014. ..... *89*
Figura 90. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 22 de marzo del 2014. ..... *89*
Figura 91. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 23 de abril del 2014. ..... *90*
Figura 92. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 28 de julio del 2014. ..... *90*
Figura 93. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 13 de agosto del 2014. ..... *91*
Figura 94. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 29 de agosto del 2014. ..... *91*
Figura 95. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 3 de diciembre del 2014. ..... *92*
Figura 96. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 19 de diciembre del 2014. ..... *92*
Figura 97. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 29 de junio del 2015. ..... *93*
Figura 98. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 15 de julio del 2015. ..... *94*
Figura 99. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 17 de septiembre del 2015. ..... *94*
Figura 100. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 3 de octubre del 2015. ..... *95*
Figura 101. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 6 de diciembre del 2015. ..... *95*
Figura 102. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 31 de julio del 2015. ..... *96*

Figura 103. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 4 de noviembre del 2015.....96
Figura 104. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 7 de enero del 2016. 98
Figura 105. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 23 de enero del 2016. 98
Figura 106. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 27 de marzo del 2016. 99
Figura 107. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 12 de abril del 2016. 99
Figura 108. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 14 de mayo del 2016.....100
Figura 109. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 30 de mayo del 2016.....100
Figura 110. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 1 de julio del 2016.....101
Figura 111. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 17 de julio del 2016.....101
Figura 112. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 18 de agosto del 2016.....102
Figura 113. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 19 de septiembre del 2016.....102
Figura 114. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 5 de octubre del 2016. 103
Figura 115. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 21 de octubre del 2016. 103
Figura 116. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 6 de noviembre del 2016.....104
Figura 117. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 8 de diciembre del 2016. 104
Figura 118. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 28 de abril del 2016. 105
Figura 119. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 22 de noviembre del 2016.....106
Figura 120. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 24 de diciembre del 2016. 106
Figura 121. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 25 de enero del 2017. 107
Figura 122. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 26 de febrero del 2017.....108
Figura 123. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 30 de marzo del 2017. 108
Figura 124. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 15 de abril del 2017. 109
Figura 125. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 1 de mayo del 2017. 109
Figura 126. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 17 de mayo del 2017.....110
Figura 127. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 18 de junio del 2017.....110
Figura 128. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 8 de octubre del 2017. 111
Figura 129. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 4 de julio del 2017.....111
Figura 130. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 17 de marzo del 2018. 113
Figura 131. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 2 de abril del 2018. 113
Figura 132. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 18 de abril del 2018. 114
Figura 133. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 4 de mayo del 2018. 114
Figura 134. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 20 de mayo del 2018.....115
Figura 135. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 5 de junio del 2018. 115
Figura 136. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 23 de julio del 2018.....116
Figura 137. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 24 de agosto del 2018.....116

Figura 138. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 9 de septiembre del 2018. ..... *117*
Figura 139. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 25 de septiembre del 2018. ..... *117*
Figura 140. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 30 de diciembre del 2018. ..... *118*
Figura 141. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 1 de marzo del 2018. ..... *118*
Figura 142. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 8 de agosto del 2018. ..... *119*
Figura 143. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 12 de noviembre del 2018. ..... *119*
Figura 144. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 31 de enero del 2019. ..... *121*
Figura 145. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 16 de febrero del 2019. ..... *121*
Figura 146. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 21 de abril del 2019. ..... *122*
Figura 147. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 7 de mayo del 2019. ..... *122*
Figura 148. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 23 de mayo del 2019. ..... *123*
Figura 149. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 24 de junio del 2019. ..... *123*
Figura 150. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 10 de julio del 2019. ..... *124*
Figura 151. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 8 de junio del 2019. ..... *124*
Figura 152. Diagrama de rosas (histograma polar) de las direcciones de dispersión de las plumas térmicas (izquierda) y de las corrientes marinas (derecha). *126*

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los cuerpos de agua costeros han sido objeto de alteraciones debido a obras que ha construido el hombre, asociadas al desarrollo de los procesos industriales (Fisher & Mustard, 2004) que tienen lugar en plantas de energía fósil (Crema & Pagliai, 1980; Devinny, 1980; Lardicci et al., 1999), plantas de tratamiento de aguas residuales (Gierach et al., 2017; Trinh et al., 2017) y centrales nucleoeléctricas (CN) (Fleischli & Hayat, 2014; Ma et al., 2017; Salgueiro et al., 2015).

Como una de las principales fuentes de alteración en las zonas costeras se pueden encontrar los efluentes térmicos de procesos industriales (Fisher & Mustard, 2004). Específicamente, las descargas térmicas de Plantas Nucleoeléctricas (PNE), que al verter aguas residuales al mar a temperaturas mayores a las del cuerpo de agua receptor, provocan alteraciones en la temperatura del agua (Huang et al., 1998). En diversas investigaciones han monitoreado la descarga de agua de refrigeración de CN y han definido el proceso de cambios en la temperatura del agua como pluma térmica (Chen et al., 2003; Ma et al., 2017; Salehi, 2017; Tang et al., 2003). El monitoreo de la pluma térmica descargada hacia las zonas costeras es una de las medidas más significativas para garantizar el desarrollo saludable del ecosistema y el ambiente marino costero (Ma et al., 2017).

Además, esta pluma térmica asociadas a otros factores climáticos externos, como las corrientes marinas, pueden afectar la temperatura inicial en la obra de toma de las CN producto de una recirculación del agua descargada, lo cual no es operativamente correcto (Jiang & Fissel, 2004; Ramírez-León et al., 2013; Suryaman et al., 2012). Este proceso de recirculación afectaría negativamente la producción de energía eléctrica de la PNE por lo que deberían tomarse medidas para evitarse (De Sa & Al Zubaidy, 2011; Durmayaz & Sogut, 2006).

La pluma térmica generalmente se monitorea midiendo la temperatura del agua en puntos de observación, a través de mediciones con boyas oceanográficas y mediciones en cruceros oceanográficos. Aunque las mediciones obtenidas por estos tipos de métodos gozan de una alta precisión, suelen tomar tiempo, su costo es generalmente elevado, demandan mucha mano de obra y recursos (Ramírez-León et al., 2013), el alcance del muestreo está restringido y solo se puede acceder a datos discretos, que no pueden reflejar la variación espacial de la influencia de la pluma térmica (Thomas et al., 2002).

En el caso de México, existe una central nucleoeléctrica denominada Laguna Verde (CNLV), la cual solo ha sido objeto de estudio y análisis desde perspectivas ecológicas (Botello, 2005; Vázquez-Botello et al., 1996), teniendo en cuenta los efectos producidos por el oleaje incidente debido a las obras de protección (I. Herrera-Díaz et al., 2011; I.-E. Herrera-Díaz et al., 2010) y utilizando modelaciones numéricas para monitorear la pluma térmica (Ramírez-León et al., 2013).

2. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

2.1. Marco Teórico

2.1.1. Teledetección

2.1.1.1. Definición, objetivos y componentes del sistema de teledetección

La Teledetección espacial es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre o marina y la atmósfera desde sensores instalados en plataformas espaciales. Por ser una técnica que no está en contacto directo con el objeto requiere que entre el sensor y el objeto haya un flujo de información, el cual es conocido como radiación electromagnética la cual puede ser emitida por el objeto o proceder de otro cuerpo y haber sido reflejada por este. Todos los cuerpos u objetos (seres vivos, planetas u objetos inanimados) emiten radiación electromagnética. La cantidad y tipo de radiación que emiten depende básicamente de su temperatura. El mayor emisor de esta radiación en el sistema solar es el Sol, y la radiación que refleja la Tierra y los objetos situados en ella es la que se utiliza comúnmente en Teledetección. Otro tipo de emisión puede provenir del mismo sensor, el cual incorpora en su sistema un rayo emisor de radiación (Chuvieco, 1996).

Los tres principales elementos que componen cualquier sistema de teledetección son: sensor (el ojo), objeto (árbol) y el flujo energético que permite poner a ambos en relación.

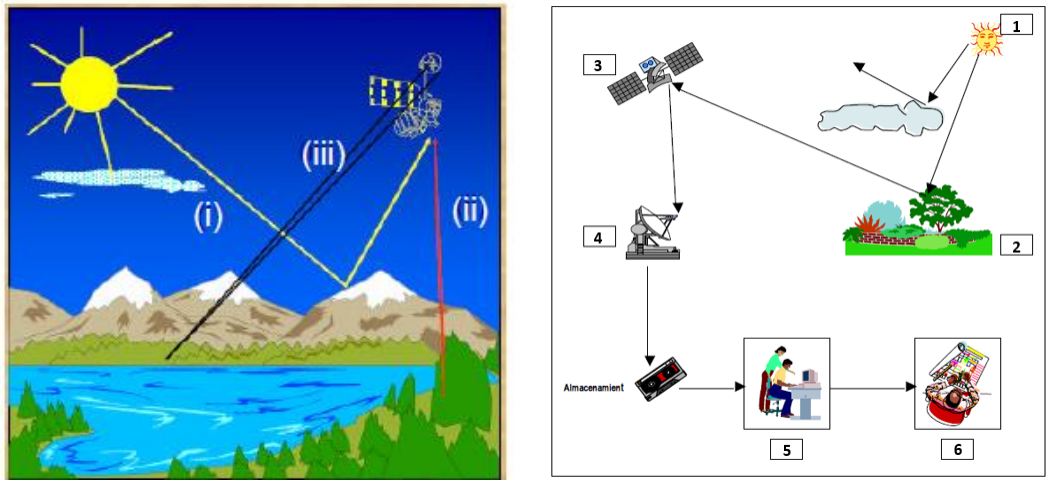


Figura 1. Formas de Teledetección (Izquierda) y Componentes de un Sistema de Teledetección (Derecha).

En el caso del ojo, ese flujo procede del objeto por reflexión de la luz solar. Podría también tratarse de un tipo de energía emitida por el propio objeto, o incluso por el sensor. Éstas son, precisamente, las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión Figura 1 (Izquierda).

Un sistema de teledetección está compuesto por los siguientes elementos Figura 1 (Derecha):

1. Fuente de Energía: Es el emisor de la radiación electromagnética que llegará a la superficie terrestre y que posteriormente será detectada por el sensor. Puede ser el sol (como fuente natural) o el mismo sensor (como fuente artificial).
2. Cubierta Terrestre: Formada por distintas masas de vegetación, suelo, agua o infraestructura. Esta recibe la radiación electromagnética proveniente de la fuente de energía (1), y la refleja o emite de acuerdo con sus características físicas.
3. Sistema Sensor: Constituido por el sensor mismo y la plataforma que lo sustenta. El sistema tiene como función captar la energía emitida por la cubierta terrestre, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.
4. Sistema de recepción y comercialización: este sistema recibe la información transmitida por la plataforma y la guarda en un formato específico y apropiado. Posterior a las correcciones necesarias, se distribuye a los interesados.
5. Intérprete o Analista: Es la persona encargada de clasificar y analizar la información contenida en la imagen para generar información temática.
6. Usuario Final: Es quien finalmente recibirá y utilizará la información ya procesada por el analista para fines específicos (Chuvieco, 1996).

2.1.1.2. Principios de Radiación

Desarrollado por Huygens y Maxwell entre otros. Se asume que la radiación se produce como resultado de oscilaciones en los campos eléctrico y magnético en las inmediaciones de los objetos. Estas oscilaciones generan ondas que contienen 2 campos de fuerzas ortogonales entre sí, eléctrico y magnético, y transmiten la energía. Los rayos X, las ondas de radio, los rayos ultravioletas y la región del visible son formas familiares de energía electromagnética.

En Teledetección, la radiación electromagnética se clasifica en espectros electromagnéticos o regiones debido a que las longitudes de onda dentro de esas regiones presentan cierta homogeneidad en determinados aspectos. En la Figura 2 se muestran los rangos aproximados de cada región del espectro. Sin embargo, estos límites pueden cambiar debido a que no son límites exactos si no continuos y las regiones pueden superponerse de acuerdo con cada autor. Para la región del visible la radiación solar tiene

más importancia que la terrestre y para la región del infrarrojo es más importante la radiación terrestre debido a que ésta se basa en el calor presente en los objetos.

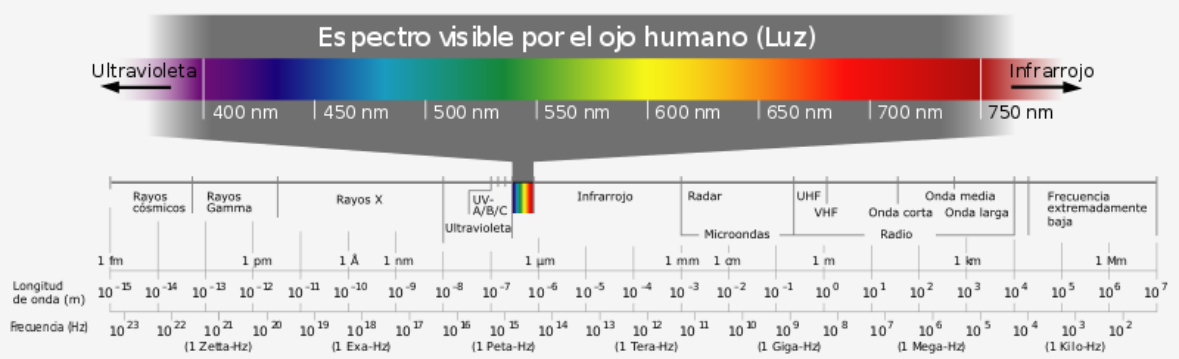


Figura 2. Espectro Electromagnético.

2.1.2. Satélites LANDSAT

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la constelación de satélites LANDSAT (LAND=tierra y SAT=satélite), que inicialmente se llamaron Satélites Tecnológicos de Recursos Terrestres (ERTS, por sus siglas en inglés), fue la primera misión de los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. La forman 8 satélites de los cuales sólo se encuentran activos el 5 y el 8. Su mantenimiento y operación está a cargo de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA), en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Los satélites LANDSAT llevan a bordo diferentes instrumentos. Su evolución buscó siempre captar más información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle, de ahí las mejoras radiométricas, geométricas y espaciales que se incorporaron a los sensores pasivos; el primero, conocido como Multiespectral Scanner Sensor (MSS), seguido de Thematic Mapper (TM) que tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor y por último, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que entre sus mejoras técnicas destaca una banda espectral (pancromática) con resolución de 15 metros.

Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que al combinarse producen una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones. Dependiendo del satélite y el sensor se incluye un canal pancromático y/o uno térmico; asimismo las resoluciones espaciales varían de 15, 30, 60 y 120m.

Especial mención merece el satélite LANDSAT-8, lanzado al espacio en agosto de 2012, por sus 11 bandas y amplias posibilidades de combinación lo que permitirá un mayor

aprovechamiento. En la Tabla 1. Características técnicas del LANDSAT-8 se presentan las características técnicas del LANDSAT-8.

Tabla 1. Características técnicas del LANDSAT-8

No.	Atributos	Descripción	
1	Tipo de Producto	Imagen L1T (Precisión, Corrección del Terreno) - ortorrectificada	
2	Formato de Imagen	Archivo GeoTIFF- Metadato en formato texto	
3	Espaciamiento de pixel	15 m Pancromático- 30 m Multiespectral	
4	Tamaño de Producto	185 km x 185 km	
5	Correcciones Geométricas	Proyectadas a un datum y proyección cartográfica, usando un Modelo Digital de Elevación (SRTM) y puntos de control terrestre (GCP)	
6	Datum Horizontal	WGS84	
7	Proyección Cartográfica	UTM (Universal Transversa de Mercator)	
8	11 Bandas Espectrales	1	Aerosol costero (Coastal Aerosol) 430 – 450 nm
		2	Azul (Blue) 450 – 510 nm
		3	Verde (Green) 530 – 590 nm
		4	Rojo (Red) 640 – 670 nm
		5	Infrarrojo cercano (NIR) 850 – 880 nm
		6	SWIR 1 (SWIR 1) 1570 –1650 nm
		7	SWIR 2 (SWIR 2) 2110 – 2290 nm
		8	Pancromático (Pan) 500 – 680 nm
		9	Cirrus (Cirrus) 1360 – 1380 nm
		10	Infrarrojo térmico (TIRS) 1; 10600 – 11190 nm
		11	Infrarrojo térmico (TIRS) 2; 11500 – 12510 nm
9	Resolución Radiométrica	12 bits	

2.1.3. Contaminación Térmica

Según (*InspirAction: Por un mundo libre de pobreza.*, s. f.), la contaminación térmica es el deterioro de la calidad del aire o del agua a causa del incremento o descenso de la temperatura. Las causas de este tipo de contaminación están muy bien identificadas y estudiadas, pero las consecuencias a la que nos enfrentamos son difíciles de revertir sin la acción drástica de gobiernos, empresas y ciudadanos. El ascenso o descenso de la temperatura del agua, de manera perjudicial para el medioambiente, tiene muchas causas:

- ✓ Las centrales termoeléctricas o nucleares producen energía. El combustible que utilizan se transforma en calor para producir esa energía. Pero para enfriar una central se necesita mucha cantidad de agua, por lo que suelen construir sus instalaciones cerca de ríos y lagos, y en zonas costeras;
- ✓ La eliminación de plantas y árboles de la costa de ríos y lagos ha hecho que desaparezca la sombra en las orillas y ha provocado el aumento de la temperatura del agua;
- ✓ Cuando el entorno ha sufrido una bajada brusca de la temperatura también hablamos de contaminación térmica. Muchas plantas de regasificación de gas natural usan agua que devuelven a los ríos y lagos más fría;

- ✓ El cambio climático (Preston, 2004);
- ✓ El escurrimiento de las superficies impermeables (Tan & Cherkauer, 2013).

2.1.4. Plumas Térmicas o Penacho Térmico.

Como se ha explicado anteriormente, el proceso de enfriamiento de los reactores nucleares de la CNLV utiliza grandes volúmenes de agua provenientes del mar, y una vez enfriado los mismos, esos grandes volúmenes de agua son descargados al mar nuevamente. El agua utilizada en el proceso de refrigeración, por ende, tiene una temperatura más alta que la fuente a la que está siendo descargada, o sea, a la temperatura ambiente que se encuentra el mar.

Según (Langford, 1990), el agua descargada que está más caliente en 0.5°C que las temperaturas de las aguas ambientales se define como penacho o pluma térmica. No obstante, este umbral no siempre será apropiado y se debe incluir la incertidumbre asociada a los sensores remotos satelitales y al método o algoritmo para recuperar la temperatura superficial del mar empleados (Faulkner et al., 2019).

2.2. Antecedentes

2.2.1. Contexto de estudio (Teledetección)

Los datos de temperatura del agua in situ tomados de pilares, boyas y plataformas móviles se han utilizado ampliamente para comprender la variación de la temperatura del agua en un rango de escalas temporales (Demars & Manson, 2013; Kaushal et al., 2010). Sin embargo, la medición in situ es costosa y requiere mucho tiempo para desplegarse sobre grandes cuerpos de agua. El agua infrarroja térmica que deja la radiación adquirida de los sensores de detección remota se ha empleado con éxito para recuperar la Temperatura Superficial del Mar (SST, por sus siglas en inglés) (Alcántara et al. 2010; Handcock et al. 2006; Hedger et al. 2007; Politi, Cutler, y Rowan 2012; Takeshige et al. 2013; Tan y Cherkauer 2013), sin embargo, en los sistemas costeros, los tamaños de píxeles grandes de la mayoría de los sensores con la resolución temporal adecuada son demasiado grandes para estudiar con eficacia los patrones espaciales y temporales cercanos a la costa. En los últimos años, ha habido varias aplicaciones de datos de clase Landsat a la temperatura superficial del mar (TsM) costera, lo que reduce significativamente el impacto de la contaminación de la línea de costa en el análisis de la TsM (Fisher & Mustard, 2004; Hook et al., 2004; Lamaro et al., 2013; Sobrino et al., 2004; Wloczyk et al., 2006).

Existen muchos estudios que han propuesto algoritmos para la determinación mediante teledetección de las temperaturas superficiales, tanto en la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST, por sus siglas en inglés) como en la TsM. Los primeros algoritmos desarrollados para determinar estas temperaturas estuvieron enfocados principalmente en LST, los cuales se fueron ajustando y adaptando a las necesidades por parte de los investigadores y a las diferentes zonas de estudios.

Según (Jensen et al., 1983), la temperatura de los objetos se puede medir utilizando sensores in situ o remotos. Sin embargo, la detección remota en la región de infrarrojo térmico del espectro electromagnético proporciona las mediciones de la temperatura aparente en un formato espacial (imagen) que facilita el mapeo de la temperatura en un área geográfica finita. Este documento identifica las consideraciones fundamentales que deben abordarse al realizar el mapeo de la temperatura de detección remota, incluidos los requisitos del usuario, los parámetros del sistema de sensores y el análisis cartográfico y las alternativas de visualización.

En el año 2003 (Tang et al., 2003), probaron la factibilidad de caracterizar la pluma térmica de la central nuclear de Daya Bay (CNDB) utilizando un sensor de un radiómetro avanzado de alta resolución denominado (AVHRR, por sus siglas en inglés). En esta investigación las imágenes satelitales se procesaron y evaluaron para el período de noviembre de 1997 a junio de 1999, donde se hicieron estimaciones del contraste térmico entre la pluma térmica y las aguas de la zona de estudio. Estas mostraron un aumento de temperatura de 1 a 3 °C, asociado principalmente con la descarga de agua de refrigeración de CNDB.

En el mismo año y zona de estudio (Chen et al., 2003), investigaron la contaminación térmica en aguas costeras a partir de datos satelitales desarrollando un algoritmo local. En este estudio utilizaron los datos de la banda térmica MT (Mapeador Temático) del satélite Landsat-5 de 1994 a 2001. El algoritmo local utilizado se muestra en la Ecuación 1. Algoritmo local utilizado por (Chen et al., 2003), donde SST es la temperatura superficial del mar y R_6 es el valor de la radiancia registrado por la banda 6 de Landsat-5 (MT). En esa investigación se demostró que las áreas de intensidad y distribución de la contaminación térmica son muy precisas, ya que la contaminación térmica es relativa a la temperatura ambiente; además de que los errores para toda el área son casi los mismos, y se eliminan cuando se calcula la intensidad de la contaminación térmica.

$$SST = 149.55 * R6 - 98.703 \quad (1)$$

En 2005 la investigación realizada en (Anupkumar et al., 2005), se examina el impacto de la descarga térmica de una central eléctrica costera tropical (ubicada en Kalpakkam en la costa este de la India) en la distribución de la temperatura cerca del área de descarga. Se llevaron a cabo estudios de monitoreo cerca de la zona de descarga mediante cruceros mensuales en bote, que cubren un área de 2.5 km^2. Se encontró que el movimiento de la pluma térmica en el mar dependía de las corrientes monzónicas. El área ocupada por el penacho termal se estimó en alrededor de 1.3 km^2, pero varió según la estación.

En el estudio realizado por (Wloczyk et al., 2006) en 2006, los datos térmicos de Landsat se emplearon para derivar las temperaturas de la superficie de los lagos y el mar. Las limitaciones de este enfoque son obvias, ya que el cálculo de las temperaturas de la superficie basadas únicamente en datos de imagen requiere de al menos dos bandas térmicas para compensar la influencia atmosférica causada principalmente por la absorción de vapor de agua.

El área de estudio de esa investigación comprende varios lagos y zonas costeras del Mar Báltico en el noreste de Alemania. Se seleccionaron imágenes Landsat-7 ETM + de nueve fechas de adquisición que cubren el período de tiempo de febrero a noviembre de 2000. Los resultados de las temperaturas de la superficie del mar y del lago derivadas se compararon con las mediciones in situ y con un modelo empírico del Deutscher Wetterdienst (Servicio Meteorológico Nacional de Alemania, DWD). Se obtuvieron desviaciones medias cuadráticas (RMS, por sus siglas en inglés) de 1.4 K para las temperaturas de la superficie del lago derivadas del satélite con respecto a las mediciones in situ y 2.2 K con respecto al modelo empírico de DWD. Este nivel puede considerarse satisfactorio, dadas las principales limitaciones de este enfoque. Solo se puede obtener una mejor precisión con instrumentos térmicos multibanda de alta resolución espacial (<100 m) que ofrecen imágenes de forma operativa.

En 2007, se realiza una investigación (Allen et al., 2007) que utiliza un mapeo de la evapotranspiración a alta resolución con calibración internalizada (METRIC). Este mapeo utiliza un modelo de procesamiento de imágenes satelitales para calcular la evapotranspiración (ET) como un residuo del balance energético de la superficie. En este caso el enfoque hacia este estudio son las bases en las que se apoya METRIC, pues utiliza el proceso de balance de energía SEBAL desarrollado en los Países Bajos por Bastiaanssen, donde los gradientes de temperatura cercanos a la superficie son una función indexada de la temperatura radiométrica superficial, eliminándose así la necesidad

de una temperatura superficial absolutamente precisa y de mediciones de temperaturas del aire. Este modelo utiliza principalmente como elementos de entrada imágenes térmicas de satélites como Landsat y MODIS, además de modelos de elevación digital y datos meteorológicos medidos dentro o cerca del área de estudio.

$$Ts = \frac{K2}{\ln\left(\left(\frac{(\varepsilon \mathrm{NB} * \mathrm{K1})}{Rc}\right)+1\right)} \quad (1)$$

Donde:

$\varepsilon \mathrm{NB}$: Emisividad correspondiente a la banda de longitud de onda del sensor térmico del satélite (Banda 10 para Landsat-8);

Rc: Radiación térmica corregida desde la superficie utilizando la radiación espectral de la banda 6 de Landsat 5 y banda 10 de Landsat 8.

Las constantes K_1 y K_2 son iguales a: K_1=607.8 y K_2=1261 $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ para Landsat 5 y K_1=666.1 y K_2=1283 $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ para Landsat 7 y K_1=774.8853 y K_2=1321.0789 $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ para Landsat 8. Rc es calculado según (Wukelic et al., 1989) como:

$$Rc = \left(\frac{Lt,6 - Rp}{\tau NB}\right) - (\varepsilon NB) * Rsky \quad (2)$$

Donde:

$L_{t,6}$: Radiancia espectral de la banda 6 de Landsat 5 o banda 10 de Landsat 8;

Rp: Resplandor de trayectoria en la banda 10.4–12.5 μm en $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$;

Rsky: Radiación térmica descendente de la banda 10 para Landsat-8, desde un cielo despejado en $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$;

τNB: Transmisividad de la banda 10 para Landsat-8 (10.4–12.5 μm de alcance). Las unidades para Rc son en $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$.

En 2009 (Jiménez-Muñoz et al., 2009), realizaron una revisión, una actualización y una extensión del algoritmo generalizado de un solo canal (SC) desarrollado por (Jiménez-Muñoz & Sobrino, 2003), el cual fue particularizado al canal de infrarrojo térmico (TIR) (banda 6) ubicado en el Sensor del Mapeador Temático (TM) Landsat-5. Este algoritmo SC se basa en el concepto de funciones atmosféricas (AF) que dependen de la transmisividad atmosférica y de las radiancias atmosféricas. Estas AF se ajustan en comparación con el

contenido de vapor de agua atmosférico para fines operativos. También realizaron ajustes actualizados utilizando el código de transferencia radiactiva MODTRAN 4, y extendieron la aplicación del algoritmo SC al canal TIR del sensor TM a bordo del satélite Landsat-4 y al sensor TM plus mejorado a bordo del satélite Landsat-7. El nuevo algoritmo SC propuesto en esta investigación recupera LST utilizando la ecuación 3. Algoritmo SC propuesto por (Jiménez-Muñoz et al., 2009). Los resultados de la prueba de datos simulados independientes de este estudio proporcionaron valores de error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) por debajo de 1 K, en la mayoría de los casos cuando el contenido de vapor de agua en la atmósfera es inferior a 2 g*cm^{-2}. Pues para valores superiores a los 3 g*cm^{-2}, se plantea que los errores no son aceptables, como ocurre con otros algoritmos SC.

$$\mathrm{Ts} = \gamma\left[\frac{1}{\varepsilon}(\psi 1\mathrm{Lsen} + \psi 2) + \psi 3\right] + \delta \qquad (3)$$

Donde:

Ts: Temperatura superficial terrestre,

γ y δ: Parámetros dependientes de la función de Planck,

ε: Emisividad de la superficie,

$\psi 1$, $\psi 2$ y $\psi 3$: Funciones atmosféricas frente al contenido de vapor de agua atmosférico ajustadas de un polinomio de segundo grado,

Lsen: Temperatura de brillo registrada en el sensor.

En 2015, se realizaron tres estudios que utilizan algoritmos ajustables a diferentes condiciones y zonas de estudios. En el primero (Ding & Elmore, 2015), se describe la climatología anual de la temperatura de la superficie del agua (WST, por sus siglas en inglés) en la Bahía de Chesapeake y se proporciona un análisis apropiado de validación e incertidumbre. También se describen las tendencias espaciotemporales en cuanto a WST se refiere en el período (1984–2010), incluyendo cómo estas tendencias podrían relacionarse con la urbanización, el efluente térmico de las instalaciones de generación de energía y las tendencias en la temperatura del aire debido al cambio climático global. En esta investigación se utiliza el algoritmo SC propuesto por (Jiménez-Muñoz et al., 2009), y se obtuvieron como principales resultados que factores como: la urbanización y la industrialización, los aumentos en la superficie impermeable y el efluente térmico de las centrales eléctricas, influyen en el aumento de las temperaturas del agua; en las cuales se

encontraron tendencias de aumento de la temperatura de la superficie del agua y la temperatura del aire en más del 92% de la bahía.

En el segundo (Du et al., 2015), desarrollaron un algoritmo práctico de ventana dividida (Split-Window, SW, por sus siglas en inglés) para estimar LST del Sensor Infrarrojo Térmico (TIRS) a bordo del satélite Landsat-8. Los coeficientes del algoritmo SW se determinaron en función de los subrangos de vapor de agua atmosférico, que fueron obtenidos a través de un método modificado de coeficiente de covarianza-varianza de ventana dividida. Este algoritmo propone la ecuación 4 para determinar la radiación del canal Bi (Ti) medida en la parte superior de la atmósfera (TOA) en un canal de infrarrojo térmico del sensor a bordo del satélite, la cual se aproxima significativamente a la realidad; y con la Ecuación 4 agregan un nuevo refinamiento del algoritmo generalizado de ventana dividida propuesto por (Wan, 2014) con un término cuadrático de la diferencia entre las temperaturas de brillo (Ti, Tj) de los canales infrarrojos térmicos adyacentes. El tercero (Wang et al., 2015), constituye el algoritmo a utilizar en la presente investigación y se encuentra explicado en el Epígrafe 6. Metodología.

$$B_i(T_i) = \varepsilon_i B_i(T_s)\tau_i + (1-\varepsilon_i)R\downarrow_{atmi}\tau_i + R\uparrow_{atmi} \quad (4)$$

Donde:

$B_i\ (T_i)$: Canal de radiancia,

τ_i: Transmitancia efectiva de la atmósfera en el canal i,

ε_i: Emisividad superficial efectiva del canal i,

$B_i\ (T_s)$: Radiancia medida si la superficie es un cuerpo negro con una temperatura de la superficie Ts (°K),

$R\downarrow_{atmi}$ y $R\uparrow_{atmi}$: Radiancia térmica atmosférica descendente y ascendente,

$$LST = b_0 + \left(b_1 + b_2\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} + b_3\frac{\triangle\varepsilon}{\varepsilon^2}\right)\frac{T_i+T_j}{2} + \left(b_4 + b_5\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + B_6\frac{\triangle\varepsilon}{\varepsilon^2}\right)\frac{T_i-T_j}{2} + b_7(T_i+T_j)^2 \quad (5)$$

Donde:

LST: Temperatura Superficial Terrestre,

T_i y T_j: Temperaturas de brillo en la parte superior de la atmósfera (TOA, por sus siglas en inglés) medidas en los canales i (~ 11.0 μm) y j (~ 12.0 μm), respectivamente,

ε: Emisividad promedio de los dos canales,

$\triangle\varepsilon$: Diferencia de emisividad entre el canal i y el canal j,

b_k (k = 0,1, ... 7): Coeficientes del algoritmo derivados de un conjunto de datos simulados con diferentes condiciones atmosféricas y de superficie.

2.2.2. Contexto en la zona de estudio (Métodos numéricos)

Existen estudios en los cuales se ha reportado la dispersión de la pluma térmica de la CNLV en el mar a través de resultados de modelos numéricos (2006; Jiménez, H. & Botello, A., 1996; Ramírez-León et al., 2013). En todos estos trabajos se han obtenido conclusiones interesantes desde el punto de vista de los efectos de la pluma térmica y de la operación de esta CNLV, ya que se han observado y modelado condiciones en las que la pluma térmica se dispersa hacia la obra de toma de la CNLV, lo cual no es operativamente correcto.

En particular, la investigación realizada en (C. I. Campos, 2006), estudia tres épocas climáticas del 2005: secas, lluvias y nortes; realizando solo 10 días de simulación para cada época climática, resultando que la pluma térmica se dispersa hacia el Norte, en la dirección donde se encuentra la obra de toma de la CNLV. Los resultados de (C. I. Campos, 2006) fueron obtenidos con una versión anterior del modelo numérico que se utilizó en (Ramírez-León et al., 2013). Antes de realizar el estudio de la dispersión de la pluma térmica de la CNLV, en (C. I. Campos, 2006) se llevó a cabo la validación del modelo numérico comparando con los resultados de (Jiménez, H. & Botello, A., 1996), para un escenario determinado. Los resultados de ambos trabajos se resumen a continuación.

2.2.2.1. Dispersión de la pluma térmica de la CNLV estudiada por Jiménez y Botello (1996)

Existe en la literatura un estudio de difusión térmica para la CNLV realizado en 1993 y reportado en (Jiménez, H. & Botello, A., 1996). En dicho estudio se caracterizó la dispersión de la pluma térmica utilizando el modelo de Stolzenbach-Harleman. La Tabla 2 muestra los parámetros considerados para la simulación numérica reportada en el trabajo (Jiménez, H. & Botello, A., 1996), los cuales corresponden a las condiciones del mes de marzo.

Tabla 2. Condiciones iniciales y de fronteras consideradas en el estudio (Jiménez, H. & Botello, A., 1996).

Corrientes marinas, en m/s	0.10
Dirección de las corrientes	N-S
Velocidad del viento, en m/s	N/A
Dirección del viento	N/A
Temperatura media del mar, en ºC	25
Gasto de descarga, en m3/s	63
Temperatura en la descarga, en ºC	38
Velocidad en el canal de descarga, en m/s	1.10
Gasto del Río El Viejón, en m3/s	N/A
Temperatura del Río El Viejón, en ºC	N/A

La Figura 3 muestra la pluma térmica reportada en (Jiménez, H. & Botello, A., 1996) y obtenida con el modelo de Stolzenbach-Harleman en 1993, la cual muestra una dispersión orientada hacia el Sur alejándose de la Obra de Toma de la CNLV, teniendo efectos hasta aproximadamente 2.2 km mar adentro a partir de la desembocadura del canal de descarga en el mar. Asimismo, se observan isotermas que van desde la máxima de 30°C hasta la mínima de 26°C.

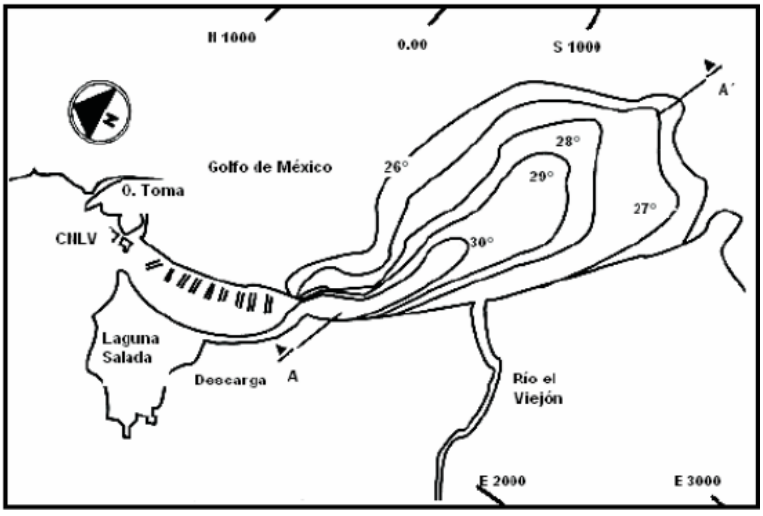


Figura 3. Pluma térmica de la CNLV obtenida con el modelo de Stolzenbach-Harleman en 1993 por (Jiménez, H. & Botello, A., 1996).

2.2.2.2. Descripción de la pluma térmica de la CNLV estudiada por Campos (2006)

En (C. I. Campos, 2006) se reprodujo la pluma térmica generada por el modelo de Stolzenbach-Harleman en 1993, con la finalidad de validar el modelo implementado en (C. I. Campos, 2006) para el estudio de la pluma térmica de la CNLV. Este mismo modelo, ampliado y con una mejor optimización desde el punto de vista numérico, es el que se utilizó

en (Ramírez-León et al., 2013). Los resultados obtenidos en (C. I. Campos, 2006) fueron publicados en el 2013 por (Ramírez-León et al., 2013). La Figura 4 presenta los resultados obtenidos en (C. I. Campos, 2006), donde los encisos (a) al (c) muestran la evolución de la pluma térmica a 40 h, 80 h y 120 h de simulación de tiempo real, mientras que los encisos (d) al (f) muestran la evolución de la hidrodinámica a través de las líneas de corriente, para los mismos intervalos de tiempo real.

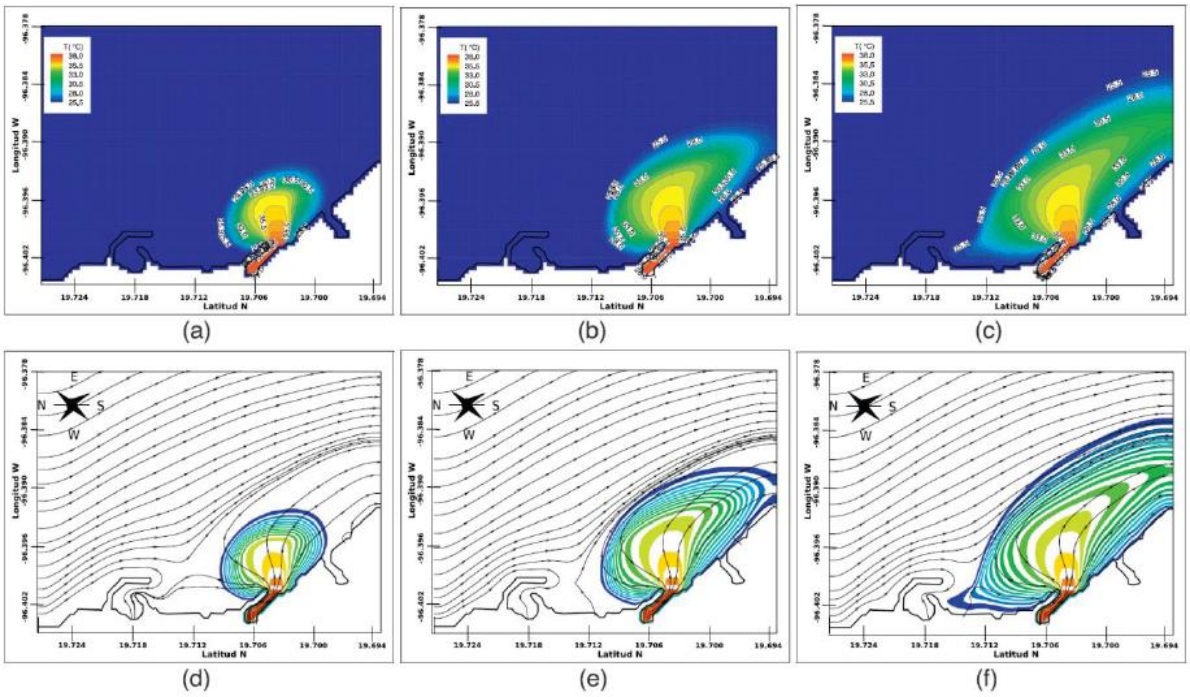


Figura 4. Resultados obtenidos en (2006) y reportadas en (Ramírez-León et al., 2013).

Los resultados de (C. I. Campos, 2006), en base a los parámetros iniciales de la Tabla 2, indicaron que la pluma térmica de la descarga se dispersa hacia el Sur, teniendo una influencia a poco más de 2 km mar adentro, a partir del punto de descarga del canal en el mar. Comparando los resultados del modelo de Stolzenbach-Harleman (Jiménez, H. & Botello, A., 1996) con los del modelo utilizado en (C. I. Campos, 2006), se concluye que ambas plumas son muy similares.

3. JUSTIFICACIÓN CONTEXTUAL Y CIENTÍFICA

Existe un vacío de información relacionada con el monitoreo de la pluma térmica utilizando técnicas de teledetección, que proporcione a las partes interesadas pertinentes de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV), los elementos necesarios de juicio para la toma de decisiones que permitan realizar una planificación estratégica con el objetivo de desarrollar acciones que permitan hacer un manejo sostenible de los recursos naturales y recuperar los que estén degradados.

El monitoreo de la pluma térmica permitirá crear un vínculo entre la comprensión de las descargas térmicas que genera la CNLV, su alcance y la toma de decisiones. Esta información generada puede convertirse en una herramienta útil y accesible, con el principal objetivo de identificar las isotermas más desfavorables ante el aumento de la temperatura del agua y facilitar la toma de decisiones encaminadas en lograr la adaptación y mitigación de los daños que se puede ocasionar al ecosistema costero.

Además, esta estimación de las variaciones térmicas en la zona costera permitirá comparar los resultados obtenidos mediante la teledetección con los estudios previos realizados que utilizan simulaciones y métodos numéricos. Es siempre preferible, y en la mayoría de los casos factible, contar con información actualizada con métodos de punta en función de lograr el cuidado y mantenimiento de los ecosistemas costeros, que tener que enfrentar procesos de recuperación complejos y extremadamente costosos luego de un desastre para el cual se pueden reducir sus consecuencias.

4. HIPÓTESIS

La utilización adecuada de técnicas de teledetección permitirá el análisis y monitoreo con alta resolución espaciotemporal de la pluma térmica de descarga de aguas de refrigeración de la CNLV, en cuanto a forma, dimensión y dirección de la dispersión.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Caracterizar la forma, dimensión y dirección de la dispersión de la pluma térmica generada por la descarga térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV) en el período 2013-2019; utilizando un algoritmo ajustable en la zona de estudio para el cálculo de la temperatura de superficie del mar mediante imágenes satelitales Landsat-8; para proporcionar información relevante a los tomadores de decisiones que apoye en la gestión del ecosistema, el ambiente marino costero y el buen funcionamiento operativo de la planta.

5.2. Objetivos específicos

- ✓ Definir la información relevante asociada al caso de estudio mediante la descarga de insumos (imágenes satelitales, datos de estaciones meteorológicas, boyas oceanográficas, manuales y softwares) en las plataformas de internet disponibles para generar la base de datos (2013-2019) utilizada en esta investigación.
- ✓ Calcular el procesamiento de las imágenes satelitales mediante los procesos de calibración y validación utilizando el algoritmo ajustable en la zona para recuperar la temperatura superficial del mar.
- ✓ Analizar los resultados alcanzados mediante el cálculo de parámetros geométricos-estadísticos y el análisis direccional circular para la caracterización espaciotemporal de la pluma térmica en cuanto a forma, tamaño y dirección de la dispersión, y para la determinación de los factores que influyen en el proceso de recirculación de la pluma térmica hacia la obra de toma de la CNLV.

6. METODOLOGÍA

6.1. Zona de estudio

La única Central Nucleoeléctrica del país es la CNLV, la cual se encuentra en la costa del Golfo de México (GDM) en el km 42.5 de la Carretera Federal Cardel-Nautla, en la localidad Punta Limón del Municipio de Alto Lucero, Veracruz (Figura 5). La central nuclear mexicana dispone de 2 reactores nucleares de 1634 MW cada uno. La CNLV está certificada por el organismo regulador nuclear de México, la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias. Las dos unidades nucleares se empezaron a construir en 1976. Concretamente, el primer reactor nuclear se empezó en octubre de 1976 mientras que el segundo reactor no empezó a construirse hasta 1977. Las licencias para operación comercial fueron otorgadas por la Secretaría de Energía. La unidad 1 obtuvo la licencia el 29 de julio de 1990 y, cinco años más tarde, el 10 de abril de 1995, la segunda unidad obtuvo la suya.

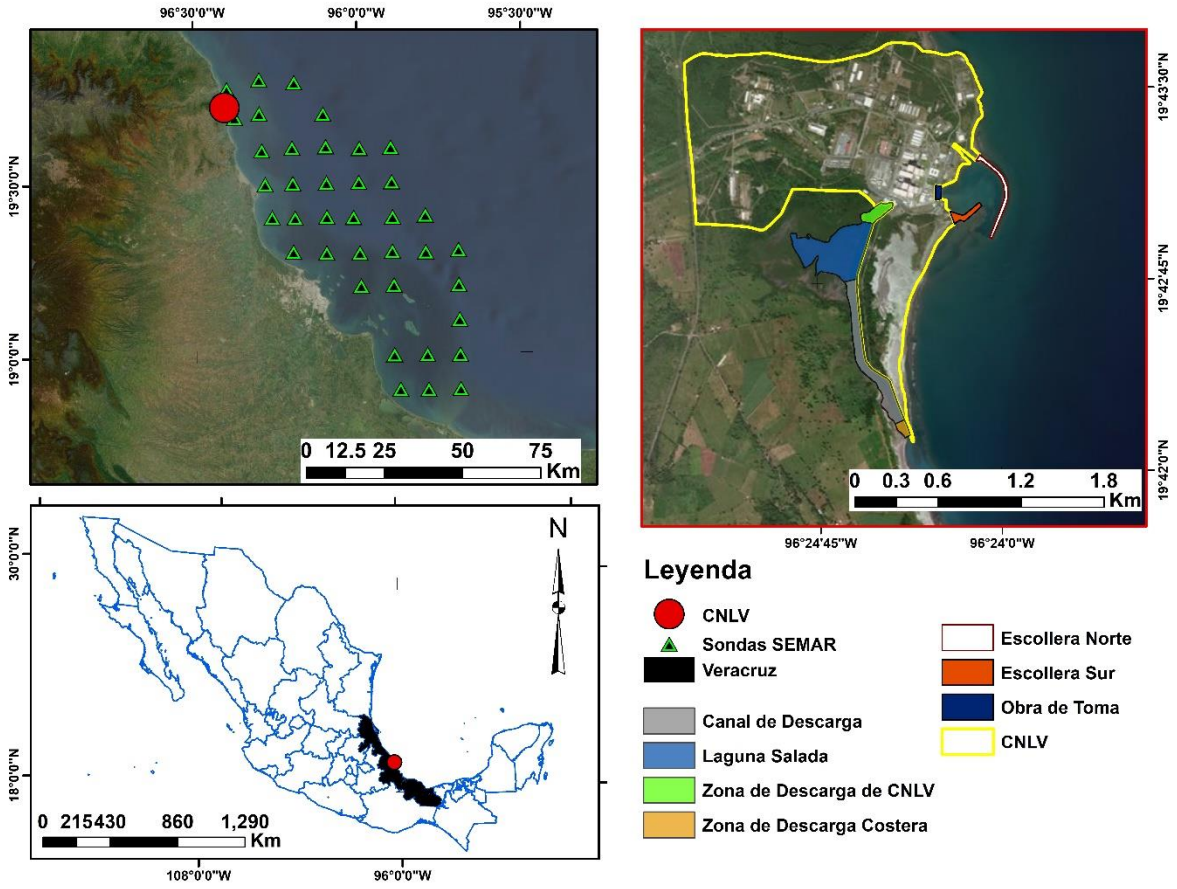


Figura 5. Sondas SEMAR, ubicación geográfica y partes de la CNLV.

La CNLV cuenta con un área de 370 ha y geográficamente se sitúa a 60 km al Noreste de la ciudad de Xalapa, 70 km al Noroeste del Puerto de Veracruz y a 290 km al Noreste de la Ciudad de México. La CNLV se localiza en la costa Nororiental del Estado de Veracruz, México, en las coordenadas 19°43’15” N 96°24’23” O. En cuanto a la topografía de la zona de estudio, la misma es principalmente plana, limitada al oeste por montañas de baja elevación, de 500 m aproximadamente en una franja litoral de 5 km. La zona de descarga de la CNLV se localiza a 1.8 km al sur de la obra de toma superficial lo que según (Salehi, 2017) distancias mayores a 1.3 km constituyen ubicaciones óptimas para las salidas de las plantas de energía.

El área de estudio forma parte del Golfo de México (GDM), el cual presenta componentes energéticos que influyen en los procesos de circulación del mar en esta región: la Corriente de Bucle y los Anillos de la Corriente de Bucle. Estas poderosas características oceánicas afectan, directa o indirectamente, casi todos los aspectos de la oceanografía del golfo (Oey et al., 2005). Los anillos formados por la corriente de bucle tienen diámetros aproximados de 200 a 300 km, una extensión vertical aproximada de 1 km y velocidades de remolino que oscilan entre los 1.8 y 2 m/s. Generalmente se trasladan hacia el oeste a razón de 2 a 5 km diarios y tienen una vida útil de meses, incluso pueden llegar a un año (Cooper, Forristall, y Joyce 1990; Elliott 1982; Forristall, Schaudt, y Cooper 1992; Nowlin Jr. 1972; Vukovich y Crissman 1986).

6.2. Determinación de la pluma térmica (Landsat-8)

Para la presente investigación se utilizó una metodología general que consta de seis etapas (Figura 6). En el caso de la determinación de la temperatura superficial del mar (TsM) se utilizó la ecuación de Plank modificada según (Allen et al., 2007). A continuación, se explican las 6 etapas de la metodología implementada.

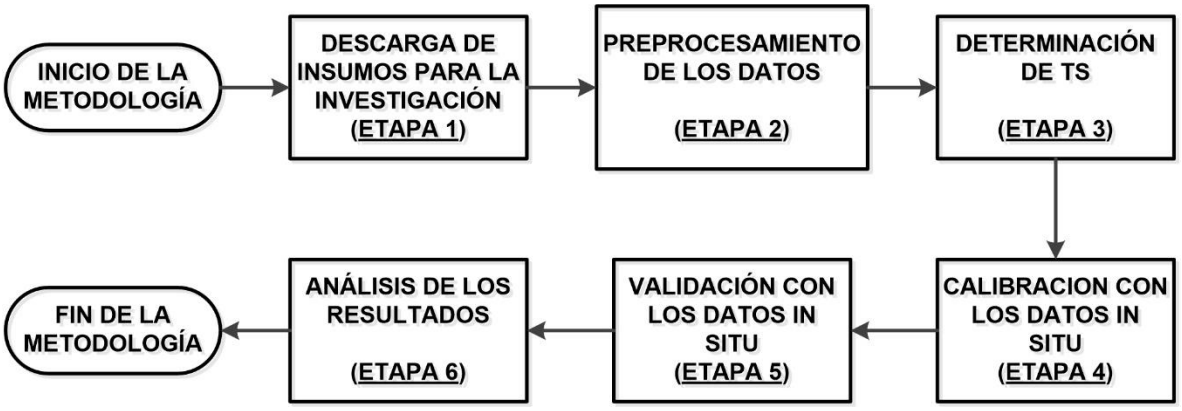


Figura 6. Flujograma general de la metodología.

Resulta importante destacar, que en esta metodología se utilizó sólo la banda 10 del satélite Landsat 8, debido a que existe una gran incertidumbre de calibración asociado a la banda 11 (Zhang et al., 2016); la cual según (Coll et al., 2012) se ve más afectada por la absorción de vapor de agua continuo y por tanto es más sensible a los errores en los perfiles atmosféricos.

Por otra parte, en la investigación realizada por (Yu et al., 2014) en cuatro sitios de estudio se obtuvieron Errores Cuadráticos Medios para la banda 10 de 0.87K, 1.01K, 0.93K y 0.57K, mientras que para la banda 11 fueron de 1.17K, 1.19K, 1.12K y 0.75K respectivamente. Por lo que se puede apreciar que la precisión de la banda 10 es mayor; como ha sido anunciado por el sitio web USGS Landsat que la variabilidad de calibración de la banda 10 es de 0.12 $W/m^2/sr/\mu m$ (~0.8K) y 0.2 $W/m^2/sr/\mu m$ (~1.75K) para la banda 11.

6.2.1. Descarga de insumos para la investigación

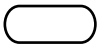
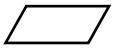
Para el estudio y análisis de la dispersión de la pluma térmica de la CNLV se utilizaron los datos proporcionados por las imágenes satelitales de Landsat 8 TIRS recopilados en el período 2013-2019, específicamente los metadatos de la banda 10. La resolución de las bandas utilizadas es de 100 m, pero las mismas están remuestreadas a 30 m cuando se descargan del repositorio web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (https://earthexplorer.usgs.gov/). Se obtuvieron un total de 140 imágenes, de las cuales fueron utilizadas sólo 68 imágenes en el período objeto de estudio de la presente investigación, debido a que en el resto de las imágenes existió un alto índice de nubosidad en la zona de estudio. Las fechas, horas de observaciones, así como la columna y la fila de estas se encuentran en el Anexo 1. También como insumos para la presente investigación, gracias a la colaboración abnegada de la Dirección General Adjunta de Oceanografía,

Hidrografía y Meteorología perteneciente a la Dirección General de Investigación y Desarrollo de la Secretaría de Marina, se obtuvieron datos de la estación meteorológica Laguna Verde de los años 2011 a 2018, así como datos in situ de las temperaturas del agua de una campaña oceanográfica realizada del 9 al 12 de mayo de 2018 (Anexo 2). Además, se utilizó el manual (Manual Landsat-8) y los softwares (Terrset y ArcGIS).

6.2.2. Preprocesamiento de los datos

Para la estimación de la dispersión de la pluma térmica empleando el sensor infrarrojo térmico Landsat 8 (TIRS), se utilizarán una serie de datos que proporciona este satélite en los metadatos de la banda 10 para determinar la radiancia, así como las constantes térmicas, los valores de los factores de re-escalado, entre otros. Las imágenes satelitales serán importadas y preprocesadas en la última versión del software TerrSet, mientras que en la Figura 7 se muestra el flujograma que resume el algoritmo empleado para determinar la TsM y su simbología se describe en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

Tabla 3. Simbología utilizada en los flujogramas de las etapas y/o procesos.

Símbolo	Descripción
	Proveedor o Inicio y/o Final de una Etapa o Proceso.
	Elementos e Información de Entrada a una Etapa o Proceso.
	Actividad y/o Proceso.
	Sub-Proceso.
	Inspección y/o Control.
	Decisión.
	Almacenamiento en el Disco Duro.

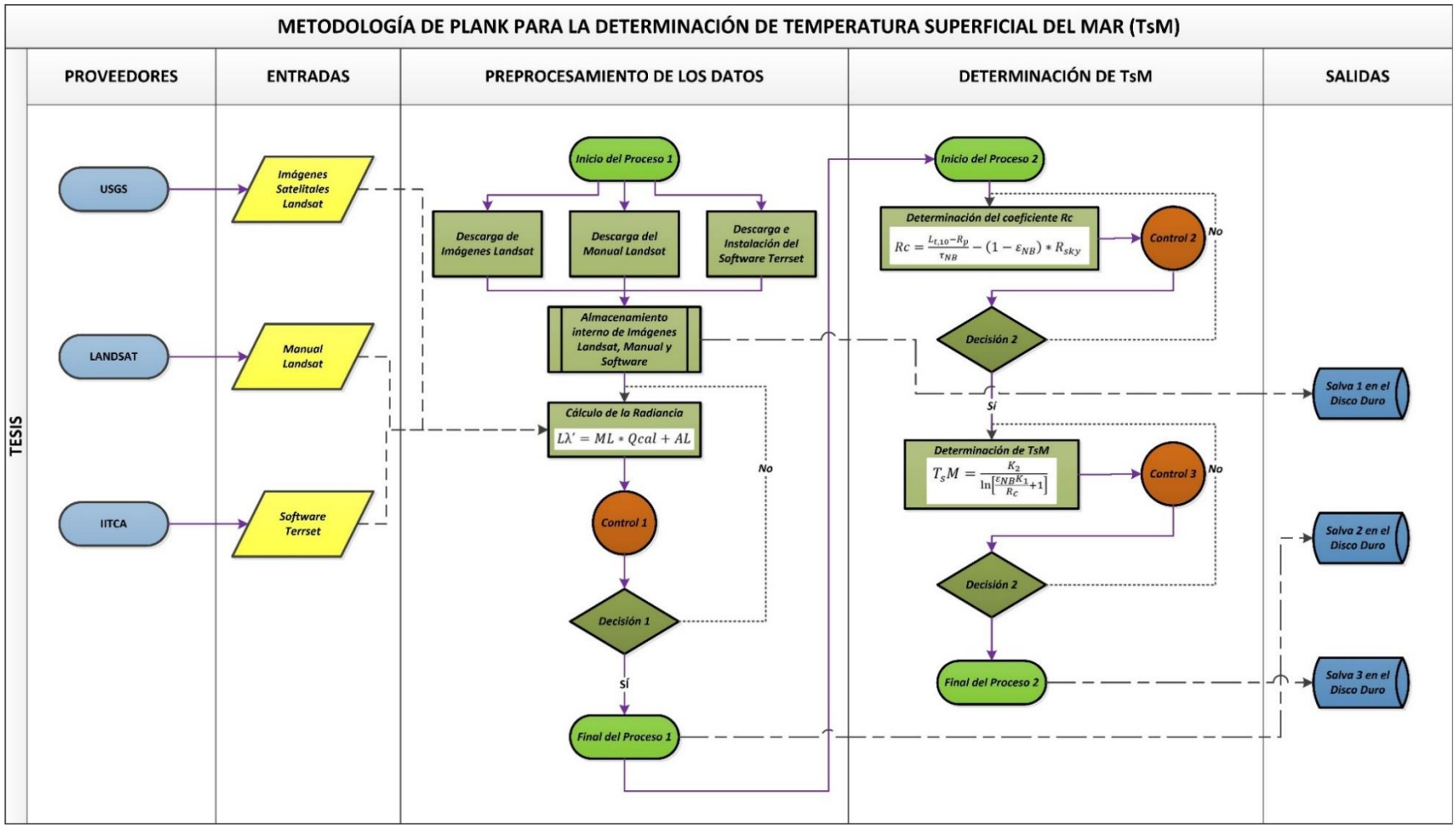


Figura 7. Flujograma metodológico utilizado para la determinación de la TsM

6.2.2.1. Determinación de la Radiancia

En el proceso de determinación de la radiancia se utiliza la metodología que se describe en el manual del usuario de Landsat 8. En este caso solo se determina la radiancia para la banda 10, así como la información de los metadatos asociadas a esta. Los datos que se utilizarán se muestran en la Tabla 4 y se obtuvieron las radiancias a partir de la ecuación 6.

Tabla 4. Factores de reescalamiento de los metadatos a utilizar para la Radiancia.

Constantes Térmicas	Bandas	
	10	11
ML	3.3420E-04	
AL	0.100000	

$$L\lambda' = ML * Qcal + AL \quad (6)$$

Donde:

Lλ´: Radiancia Espectral (W/ (m^2* sr * µm));

ML: Factor de escala multiplicativo de radiancia de la banda (RADIANCE_MULT_BAND_n de los metadatos);

AL: Factor de escala aditivo de radiancia para la banda (RADIANCE_ADD_BAND_n de los metadatos);

Qcal: Valor de píxel de nivel 1 en números digitales (ND).

6.2.3. Determinación de TsM

Para la determinación de la TsM, fueron necesarios dos procesos antecesores que aseguraron una efectiva recuperación de esta. Estos procesos fueron la calibración y validación y se describen a continuación.

6.2.3.1. Proceso de Calibración

Para la realización de la calibración del modelo en la zona de estudio se llevó a cabo una validación cruzada, con el objetivo de obtener la variable emisividad de la superficie del mar en la zona de estudio; siempre respetando el rango (9.2 a 9.8) establecido por (Newman et al., 2005) para emisividades de la superficie del mar según su concentración salina, donde 9.2 y 9.8 representan valores de emisividades para cuerpos de agua muy salados y cuerpos de agua muy dulces respectivamente.

6.2.3.2. Proceso de Validación

Las temperaturas recuperadas por la metodología empleada en esta investigación se comparan con las mediciones in situ facilitadas por la SEMAR. Las mediciones in situ se realizaron mediante una campaña del 9 al 12 de mayo del 2018, y las cuatro imágenes Landsat 8 existentes en ese mismo mes y año datan del 4 y 20 de mayo de 2018; siendo dos imágenes de cada día, pues se obtuvieron dos imágenes del mismo día en ambos casos que están en la misma columna (24) pero en diferentes filas (46-47). Como se puede apreciar entre los datos modulados y observados existe una diferencia significativa de tiempo que oscila entre 5 y 8 días de diferencia; diferencia que tuvo que ser considerada en este estudio por la falta de datos in situ que coincidan con la temporalidad de adquisición de las imágenes que registra Landsat 8.

En el proceso de validación se realizó una correlación lineal entre los datos calculados y los datos in situ obtenidos de la SEMAR. También se determinó la raíz del Error Cuadrático Medio (ECM) y el Sesgo (S) para cada uno de los pares de imágenes validados, así como el ECM y el S de la validación de forma global. El cálculo del ECM y el S se utilizaron las ecuaciones 7 y 8 respectivamente.

$$ECM = \sqrt{\sum \frac{1}{n} (y_{mod} - y_{obs})^2} \quad \text{..... (7)}$$

Donde:

n: total de observaciones;

y_{mod}: valores de temperaturas modelados utilizando el algoritmo de la presente investigación;

y_{obs}: valores de temperaturas observados utilizando los datos in situ del sondeo de la SEMAR.

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{1=n} (y_{mod} - y_{obs}) \text{.....(8)}$$

6.2.3.3. Cálculo de la TsM

En esta tercera etapa de la metodología, se utiliza la ecuación de Plank modificada según (Allen et al., 2007), la cual presenta una corrección de emisividad atmosférica y superficial:

$$T_s M = \frac{K_2}{\ln\left[\frac{\varepsilon_{NB} K_1}{R_C} + 1\right]} \quad (9)$$

Donde:

ε_{NB}: emisividad correspondiente a la banda de longitud de onda del sensor térmico del satélite (Banda 10 para Landsat-8);

R_c: radiancia térmica corregida desde la superficie utilizando la radiancia espectral de la banda térmica 10 de Landsat 8;

Las constantes K_1 y K_2 para los diferentes satélites Landsat se muestran en la Tabla 5, y tienen como unidades de medidas (W m^{-2} sr^{-1} μm^{-1}).

Tabla 5. Constantes K1 y K2 para los satélites Landsat-5, Landsat-7 y Landsat 8.

Constantes	Satélite Landsat		
	5	7	8
K_1	607.8	666.1	774.8853
K_2	1261	1283	1321.0789

Para la determinación de la radiancia térmica corregida (Rc), se utiliza la ecuación definida por (Wukelic et al., 1989):

$$Rc = \frac{L_{t,10} - R_p}{\tau_{NB}} - (1 - \varepsilon_{NB}) * R_{sky} \quad (10)$$

Donde:

$L_{t,10}$: Radiancia espectral de la banda 10 de Landsat 8 (W m^{-2} sr^{-1} μm^{-1});

R_p: Radiancia de la columna en la banda de 10.4-12.5 µm (W m^{-2} sr^{-1} μm^{-1});

R_{sky}: Radiación térmica descendente de la banda 10 para Landsat-8 (W m^{-2} sr^{-1} μm^{-1});

τ_{NB}: Transmisividad de la banda 10 para Landsat-8 en un rango de 10.4-12.5 µm. Las unidades de medidas para Rc son (W m^{-2} sr^{-1} μm^{-1}).

En la investigación realizada por (Allen et al., 2007), se lleva a cabo una calibración para obtener los valores óptimos de R_p, τ_{NB} y R_{sky} con el objetivo de alcanzar valores más precisos y consistentes de R_c. En la Tabla 6 se muestran estos valores medios obtenidos, los cuales se utilizaron en la presente investigación.

Tabla 6. Constantes utilizadas para la determinación de Rc.

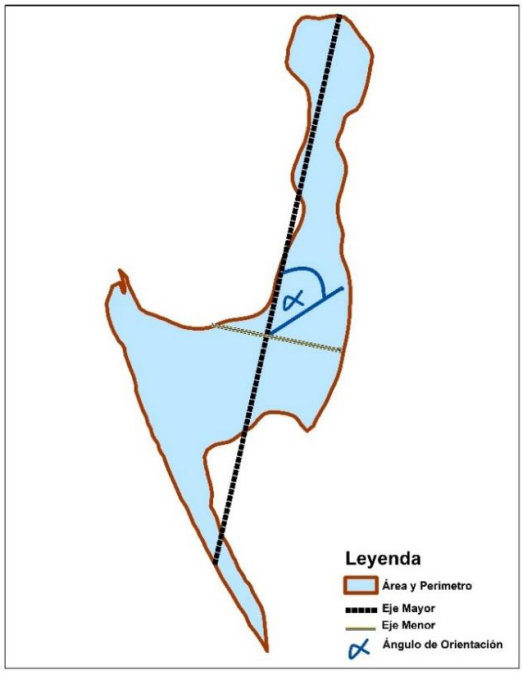
Cte	R_p	τ_{NB}	R_{sky}
Valores	0.91	0.866	1.32

6.2.3.4. Parámetros Geométricos y Estadísticos de la Pluma Térmica

Para el análisis y estudio de las diferentes características que presentan las diferentes plumas térmicas (forma, dimensión y dirección de la dispersión) se utilizaron parámetros

geométricos (área, perímetro, eje mayor, eje menor y orientación) y parámetros estadísticos (valor máximo, valor mínimo, rango, media y desviación estándar, STD por sus siglas en inglés). A través de la determinación de los parámetros geométricos (Figura 8) se determinan la forma, dimensión y dirección de las plumas térmicas; mientras que los parámetros estadísticos permiten el análisis tanto general como específico de cada isoterma que conforma la pluma, así como la razón de dispersión de una isoterma a otra. En el caso de la determinación de los parámetros longitud de la pluma térmica y orientación, se realizaron de forma manual utilizando los instrumentos del software Arcgis, debido a que este software en su módulo "zonal geometry as a table" los calcula como si la pluma térmica fuera un polígono; y en la presente investigación esos dos parámetros los necesitábamos a partir de la zona de descarga del canal de descarga hacia la zona costera del mar.

Figura 8. Parámetros Geométricos de la Pluma Térmica.



6.2.3.5. Diferenciales y gradientes térmicos de las Plumas Térmicas

En la presente investigación, se determinaron los diferenciales y gradientes térmicos con el objetivo de conocer estas características en las plumas térmicas. El diferencial de la pluma térmica definido por ΔTsM (PT), se determinó para conocer la diferencia entre la isoterma mayor y la isoterma menor que forman las plumas térmicas según la ecuación:

$$\Delta\text{TsM (PT)} = ISO_{máxima} - ISO_{mínima} \quad (11)$$

Donde:

ISOmáxima: Temperatura (°C) de la isoterma máxima que conforma la pluma térmica;

ISOmínima: Temperatura (°C) de la isoterma mínima que conforma la pluma térmica.

Por otra parte, el diferencial térmico de la OT y la TAM definido por ΔTsM (OT-TAM), se calculó según la ecuación 12, para conocer la diferencia en grados celcius existente entre la temperatura del agua que se extrae del mar en la OT y la TAM.

$$\Delta\mathrm{TsM}\ (\mathrm{OT}-\mathrm{TAM}) = T_{OT} - T_{TAM} \quad \text{.....12}$$

Donde:

T_{OT}: Temperatura (°C) del agua que se extrae del mar en la obra de toma;

T_{TAM}: Temperatura (°C) ambiente del mar en la zona de estudio.

Por último; el diferencial térmico existente entre la zona de descarga y la obra de toma definido por ΔTsM (ZD-OT), se calculó según la ecuación 13, para determinar la diferencia en grados celcius existente entre la temperatura del agua en la zona de descarga y la temperatura que se extrae del mar en la obra de toma.

$$\Delta\mathrm{TsM}\ (\mathrm{ZD}-\mathrm{OT}) = T_{ZD} - T_{OT} \quad \text{.....13}$$

Donde:

T_{ZD}: Temperatura (°C) del agua en la zona de descarga hacia el mar.

En cuanto al gradiente térmico (GT), se calculó mediante la ecuación 14 con el objetivo de determinar la variación de temperatura por unidad de distancia (Km) en la pluma térmica.

$$GT = \frac{\Delta\mathrm{t}}{\Delta\mathrm{x}} = \frac{\Delta\mathrm{TsM}\ (\mathrm{PT})}{Long\ (PT)} \quad \text{.....14}$$

Donde:

GT: Gradiente térmico de la pluma térmica (°C/Km);

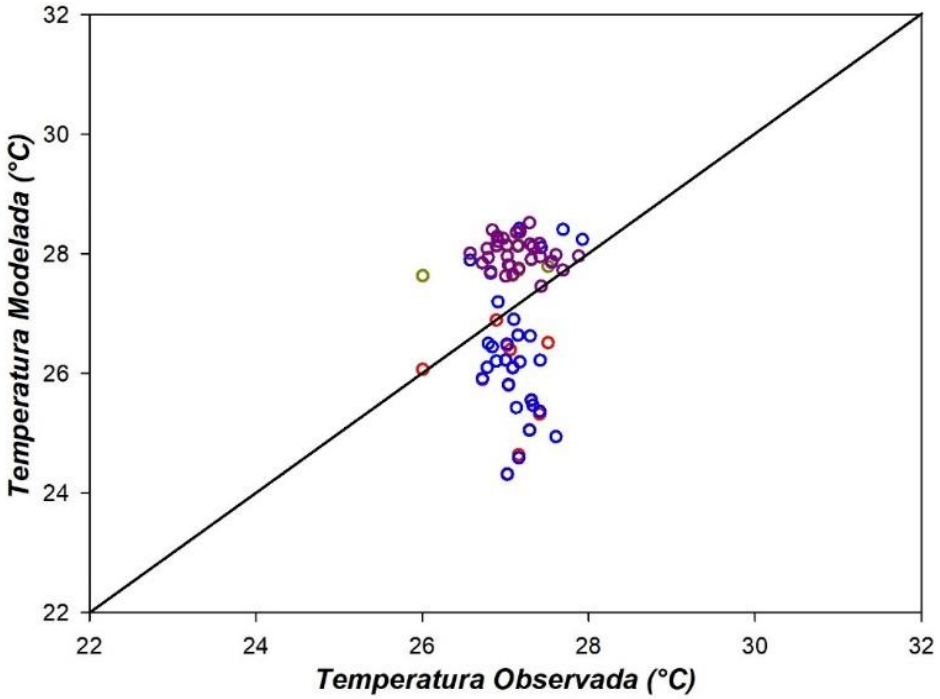
Long (PT): Longitud de la pluma térmica (Km).

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Calibración y Validación con los datos in situ

El tipo de validación cruzada que se utilizó fue aleatorio y se realizaron un total de 100 iteraciones, obteniendo como resultado un coeficiente de variación de 0.30 y una emisividad óptima para la zona de estudio de 0.966.

Por otra parte, en el proceso de validación, la Figura 9 muestra una correlación general aceptable obtenida entre los datos modelados y los datos observados con un Error Cuadrático Medio (ECM) global de 1.18 y un Sesgo global de 0.01.



Escenas	ECM	S	n
4 de Mayo de 2018 (Path:24 Row:46)	1.41	-1.15	17
4 de Mayo de 2018 (Path:24 Row:47)	1.32	-0.62	16
20 de Mayo de 2018 (Path:24 Row:46)	0.95	0.85	32
20 de Mayo de 2018 (Path:24 Row:47)	0.81	0.87	31
Global	1.18	0.01	96

Figura 9. Regresión Lineal General.

Por otra parte, en las Figura 10 y Figura 11 se pueden observar los errores puntuales de cada escena, los cuales se encuentran en los rangos de 0.04-2.71 y 0.02-1.62 para las imágenes del 4 y 20 de mayo de 2018 respectivamente; así como los errores cuadráticos medios de cada una de las cuatro escenas independientes; donde se obtuvieron resultados

aceptables, en los que el ECM y el sesgo oscilan en los rangos de (0.81 a 1.41) y (-1.15 a 0.87) respectivamente.

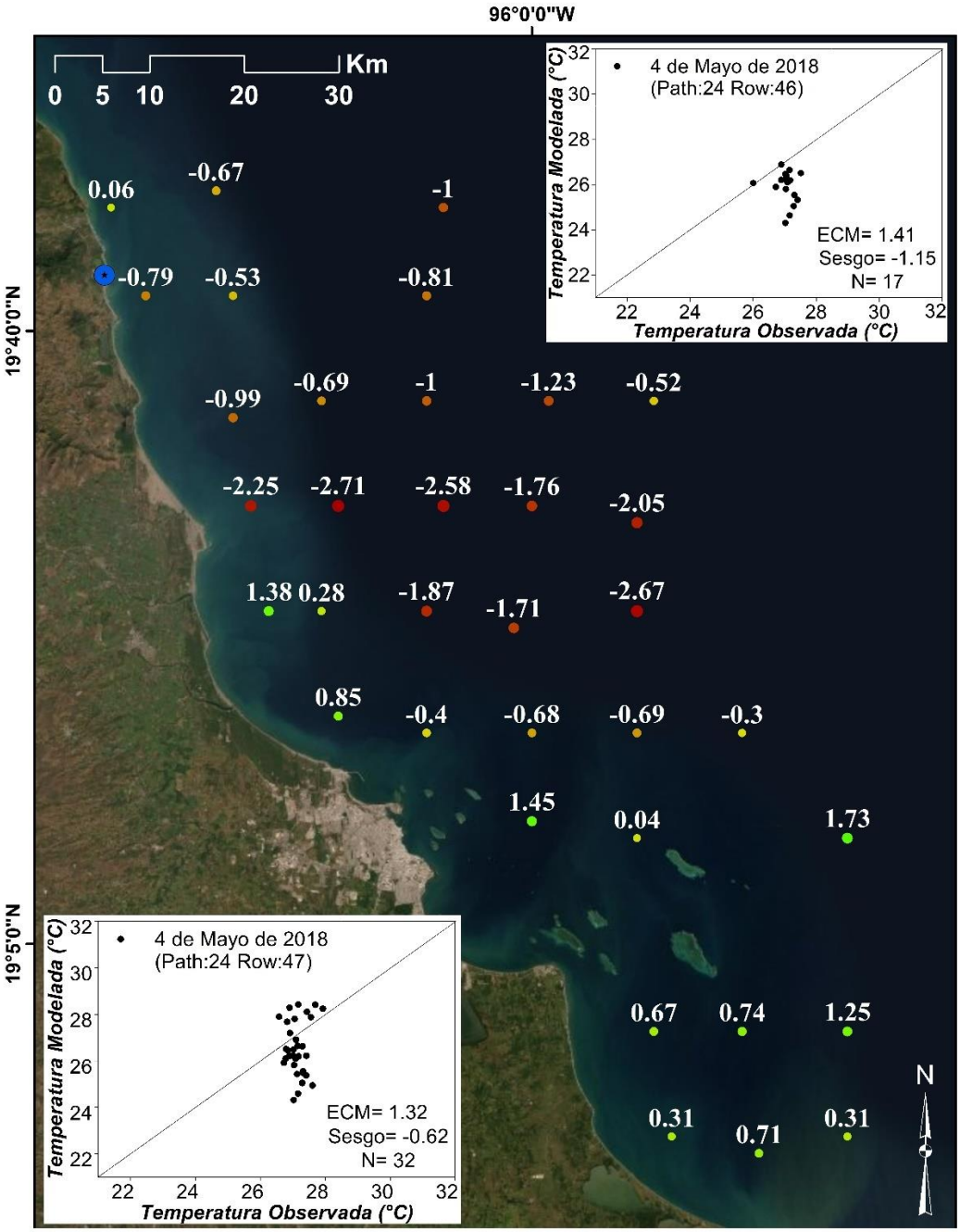


Figura 10. Sesgo, ECM y errores puntuales del 4 de mayo de 2018 utilizada en la validación.

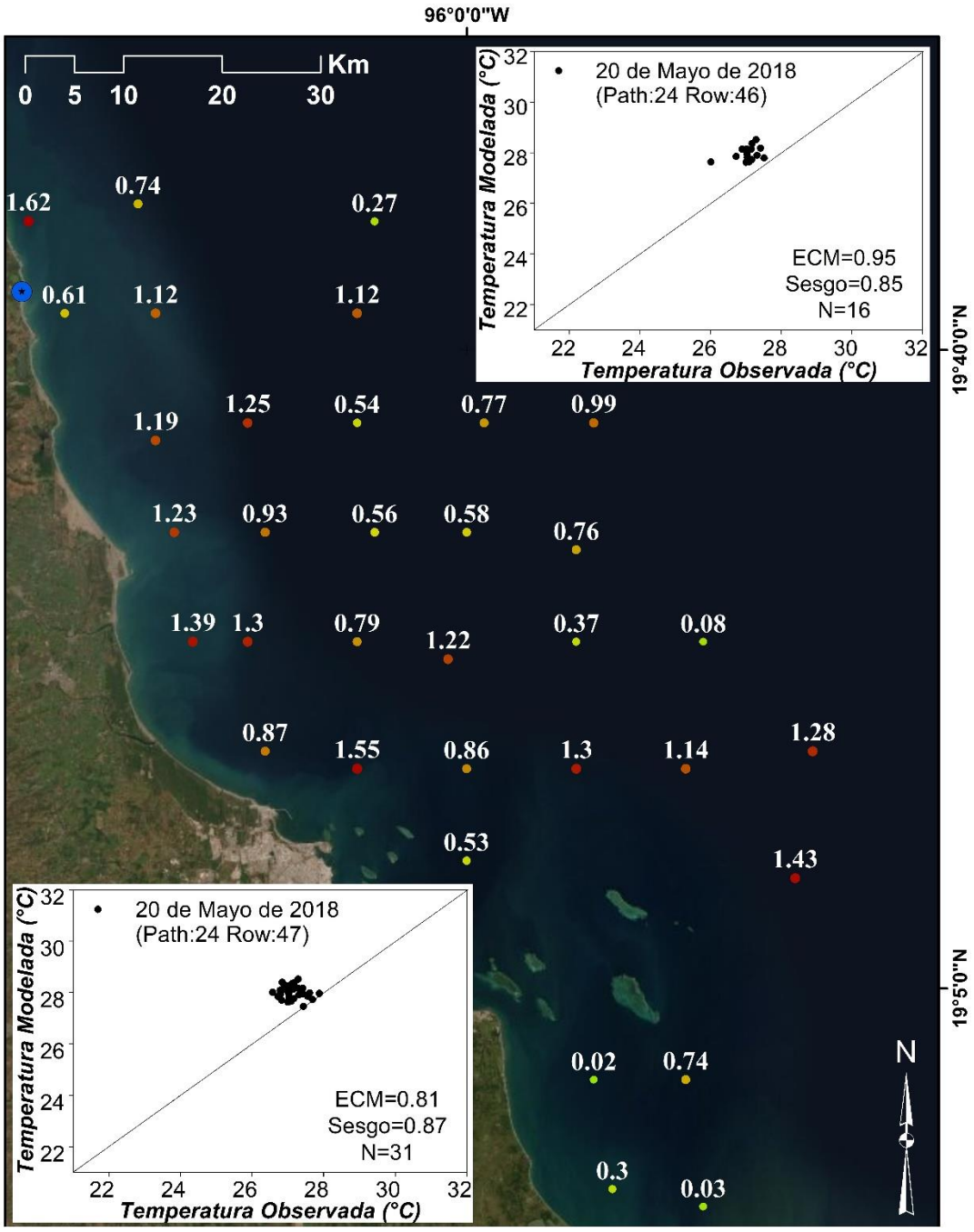


Figura 11. Sesgo, ECM y errores puntuales del 20 de mayo de 2018 utilizada en la validación.

7.2. Resultados de la investigación

7.2.1. Resultados generales del período 2013-2019

A continuación, se muestran en las Tabla 7 y Tabla 9 un resumen general de las principales características de las plumas térmicas en el período de estudio 2013-2019. En el epígrafe 7.2.1. se muestra un análisis específico anual de las plumas térmicas y sus características. En la Tabla 7 se muestra la clasificación de las plumas térmicas en cuanto a la dirección de la dispersión, o sea la circulación, y el nivel de influencia e incidencia que tienen las diferentes isotermas que llegan a la obra de toma de forma directa o indirecta. En la Tabla 8 se muestran los cinco tipos de clasificación definida en esta investigación, donde fueron factores determinantes en los tipos de clasificación, la orientación directa (D) o indirecta (I) y las temperaturas altas (A) o bajas (B) de las isotermas que recirculan hacia la obra de toma. Como principal resultado analizando la Tabla 8, se puede observar que independientemente del tipo de clasificación que tengan las plumas térmicas, el proceso de recirculación hacia la obra de toma se visualiza en 52 escenas, lo que representa aproximadamente el 77% del total de escenas analizadas.

Por otra parte, en la Tabla 9, se muestran un resumen de las principales características de las plumas térmicas asociadas a las temperaturas, diferenciales y gradientes térmicos. En cuanto a temperaturas modeladas, se muestran temperaturas obtenidas en la zona de descarga (en este caso coincide con la temperatura máxima de las isotermas que forman las plumas térmicas), temperaturas que coinciden con las isotermas mínimas de las plumas térmicas, temperaturas en la OT y TAM en la zona de estudio.

Tabla 7. Tabla resumen asociada a las características de las PT en el período 2013-2019.

Fecha	Circulación	Longitud PT (km)	Dirección PT (°)	Área PT (Km²)	Perímetro PT (Km)	Velocidad CM (m/s)	Dirección CM (°)
22/05/2013	DA	7.73	155.30	40.83	72.19	0.15	159.00
07/06/2013	DA	9.06	105.86	27.92	100.38	0.10	96.00
25/07/2013	S	2.19	115.46	3.67	17.72	0.30	127.00
13/10/2013	DA	3.85	106.32	10.71	25.47	0.10	98.00
02/02/2014	S	0.84	124.33	0.63	13.53	0.15	110.00
18/02/2014	S	1.44	66.17	0.91	11.03	0.15	54.00
22/03/2014	DA	2.64	164.33	3.57	20.92	0.10	143.00
23/04/2014	S	0.99	157.52	0.94	13.14	0.05	136.00
28/07/2014	IB	2.30	69.12	2.46	28.20	0.10	60.00
13/08/2014	IB	4.80	24.84	6.50	40.56	0.20	30.00
29/08/2014	S	3.08	132.05	8.56	33.29	0.10	127.00

03/12/2014	IB	4.12	28.14	3.38	28.59	0.20	13.00
19/12/2014	S	1.56	103.23	2.20	19.64	0.25	166.00
29/06/2015	IB	2.79	32.68	6.40	23.51	0.30	20.00
15/07/2015	IB	2.69	149.05	4.95	25.53	0.10	166.00
31/07/2015	IB	5.68	93.63	10.08	43.26	0.10	115.00
17/09/2015	DB	6.01	169.57	13.47	44.77	0.05	150.00
03/10/2015	IA	7.20	51.36	14.73	51.29	0.10	37.00
04/11/2015	DA	2.38	82.46	5.72	19.33	0.10	68.00
06/12/2015	S	3.59	33.07	1.09	17.21	0.30	26.00
07/01/2016	IB	2.95	32.19	2.19	18.86	0.10	31.00
23/01/2016	IB	2.85	29.19	1.02	16.02	0.10	20.00
27/03/2016	DB	1.14	97.33	4.35	24.88	0.10	125.00
12/04/2016	S	1.81	78.49	2.27	14.61	0.20	40.00
28/04/2016	IA	4.67	42.36	9.13	32.05	0.25	22.00
14/05/2016	IB	2.70	42.81	4.84	24.38	0.10	20.00
30/05/2016	DA	4.07	149.55	15.63	41.18	0.10	156.00
01/07/2016	S	1.43	134.94	0.94	12.67	0.05	136.00
17/07/2016	IB	3.01	67.52	4.60	19.75	0.10	40.00
18/08/2016	IB	2.25	64.34	4.50	19.44	0.15	72.00
19/09/2016	DA	4.03	121.69	9.73	31.71	0.10	124.00
05/10/2016	IA	3.21	132.01	7.34	30.75	0.05	131.00
21/10/2016	S	1.15	46.70	0.46	5.57	0.30	41.00
06/11/2016	IB	2.28	34.17	3.25	24.32	0.20	15.00
22/11/2016	IB	3.00	106.17	8.32	28.22	0.20	131.00
08/12/2016	IB	1.40	121.65	4.49	26.70	0.10	119.00
24/12/2016	IB	1.91	100.66	3.74	19.49	0.20	108.00
25/01/2017	DA	4.39	147.73	7.43	30.68	0.05	127.00
26/02/2017	IB	3.64	56.30	5.22	20.19	0.10	31.00
30/03/2017	IA	3.92	38.82	9.69	37.99	0.20	42.00
15/04/2017	S	7.30	36.75	9.92	40.76	0.05	29.00
01/05/2017	IB	3.92	24.53	2.04	20.02	0.20	23.00
17/05/2017	DA	2.18	160.52	2.45	23.06	0.20	171.00
18/06/2017	DA	7.00	141.64	11.76	56.06	0.05	144.00
04/07/2017	DB	7.05	159.77	19.43	46.50	0.10	144.00
08/10/2017	IB	5.47	46.94	7.09	36.88	0.10	35.00
01/03/2018	S	3.74	171.45	6.51	29.17	0.15	197.00
17/03/2018	IB	6.20	39.48	9.62	38.18	0.10	62.00
02/04/2018	DA	2.76	160.81	2.74	21.60	0.20	153.00
18/04/2018	DA	3.70	168.65	4.13	24.87	0.20	191.00
04/05/2018	S	2.10	161.99	3.88	16.15	0.15	159.00
20/05/2018	DB	7.18	158.78	8.75	39.01	0.10	145.00
05/06/2018	DA	2.63	166.81	3.65	18.09	0.10	164.00
23/07/2018	DA	2.97	148.03	5.45	25.60	0.30	194.00

08/08/2018	S	2.79	37.68	2.85	13.44	0.20	33.00
24/08/2018	IA	4.13	48.97	7.99	30.60	0.05	32.00
09/09/2018	IA	2.42	90.13	3.64	22.23	0.05	86.00
25/09/2018	DA	4.06	155.59	6.28	23.88	0.10	157.00
12/11/2018	S	2.01	108.42	4.15	19.71	0.15	99.00
30/12/2018	IB	3.16	36.60	3.02	22.60	0.15	13.00
31/01/2019	S	2.11	26.23	1.18	7.50	0.20	21.00
16/02/2019	IB	3.17	37.35	4.33	24.66	0.20	38.00
21/04/2019	DA	3.71	157.60	6.42	26.79	0.20	177.00
07/05/2019	DA	5.71	174.94	8.23	40.35	0.20	177.00
23/05/2019	IA	2.43	36.80	3.31	23.81	0.20	48.00
08/06/2019	DA	3.62	165.94	5.85	26.00	0.05	169.00
24/06/2019	DB	2.69	164.51	3.81	18.77	0.30	188.00
10/07/2019	IB	5.59	45.87	6.42	34.89	0.10	28.00

Tabla 8. Clasificación definida para las PsTs en cuanto a la circulación y la intensidad de las ISOs.

Tipos de Circulación	Definición	Casos (#)
DA	La pluma térmica se dirige de manera directa con temperaturas altas a la obra de toma en dirección N y NE	18
DB	La pluma térmica se dirige de manera directa con temperaturas bajas a la obra de toma en dirección N y NE	10
IA	La pluma térmica se dirige de manera indirecta con temperaturas altas a la obra de toma en dirección E y SE	7
IB	La pluma térmica se dirige de manera indirecta con temperaturas bajas a la obra de toma en dirección E y SE	17
S	Sin Circulación a la obra de toma	16
Total		68

Tabla 9. Tabla resumen general asociada a las temperaturas modeladas, diferenciales y GT de las PsTs.

FECHA	TsM ZD (°C)	TsM OT (°C)	ISO MÍN DE LA PT (°C)	TsM TAM(°C)	ΔTsM PT (°C)	GT (°C/km)	ΔTsM OT-Mar (°C)	ΔTsM ZD-OT(°C)
22/05/2013	32.00	30.15	28.0	24.98	1.85	0.24	5.17	1.85
07/06/2013	33.00	29.55	28.5	28.25	3.45	0.38	1.30	3.45
25/07/2013	31.00	28.14	28.0	26.75	2.86	1.30	1.39	2.86
13/10/2013	33.00	31.65	30.0	29.35	1.35	0.35	2.29	1.35
02/02/2014	31.00	26.70	28.0	24.20	4.30	5.12	2.50	4.30
18/02/2014	30.50	26.44	28.0	24.46	4.06	2.82	1.97	4.06
22/03/2014	32.50	29.42	28.0	26.77	3.08	1.17	2.65	3.08
23/04/2014	31.00	27.98	28.0	25.99	3.02	3.05	1.99	3.02
28/07/2014	28.00	27.39	26.5	26.06	0.61	0.26	1.34	0.61
13/08/2014	30.00	27.21	26.0	25.61	2.79	0.58	1.60	2.79
29/08/2014	30.50	26.62	26.0	26.86	3.88	1.26	-0.24	3.88
03/12/2014	30.00	27.13	26.0	25.28	2.87	0.70	1.85	2.87

19/12/2014	30.00	26.21	26.0	24.84	3.79	2.43	1.37	3.79
29/06/2015	30.00	27.67	27.0	23.12	2.33	0.84	4.55	2.33
15/07/2015	32.00	28.38	28.0	27.68	3.62	1.35	0.70	3.62
31/07/2015	25.50	24.55	23.5	22.61	0.95	0.17	1.94	0.95
17/09/2015	31.00	27.81	27.0	26.65	3.19	0.53	1.15	3.19
03/10/2015	34.00	31.14	30.0	29.74	2.86	0.40	1.40	2.86
04/11/2015	33.50	29.65	29.0	28.57	3.85	1.62	1.08	3.85
06/12/2015	30.00	24.70	24.5	24.20	5.30	1.48	0.50	5.30
07/01/2016	30.50	26.63	26.0	25.91	3.87	1.31	0.72	3.87
23/01/2016	31.00	25.00	24.0	24.37	6.00	2.10	0.63	6.00
27/03/2016	31.00	28.78	27.5	26.65	2.22	1.95	2.13	2.22
12/04/2016	24.00	20.94	21.0	19.65	3.06	1.69	1.29	3.06
28/04/2016	35.00	31.12	29.5	29.20	3.88	0.83	1.93	3.88
14/05/2016	31.50	28.49	27.0	26.04	3.01	1.11	2.45	3.01
30/05/2016	33.50	30.14	28.5	28.71	3.36	0.83	1.43	3.36
01/07/2016	24.50	22.55	22.5	19.38	1.95	1.36	3.18	1.95
17/07/2016	32.00	27.10	27.0	23.65	4.90	1.63	3.45	4.90
18/08/2016	30.00	26.62	26.5	26.00	3.38	1.50	0.62	3.38
19/09/2016	32.50	29.25	28.5	28.09	3.25	0.81	1.16	3.25
05/10/2016	33.50	30.06	29.5	28.92	3.44	1.07	1.14	3.44
21/10/2016	28.00	24.88	24.5	20.94	3.12	2.71	3.94	3.12
06/11/2016	33.00	27.89	27.5	27.04	5.11	2.24	0.85	5.11
22/11/2016	34.00	28.28	27.5	26.93	5.72	1.91	1.35	5.72
08/12/2016	32.00	26.95	26.5	25.82	5.05	3.61	1.13	5.05
24/12/2016	33.50	27.56	27.0	26.15	5.94	3.11	1.41	5.94
25/01/2017	34.00	29.89	28.5	28.17	4.11	0.94	1.72	4.11
26/02/2017	31.00	27.27	26.5	25.81	3.73	1.02	1.47	3.73
30/03/2017	33.00	31.25	29.0	28.49	1.75	0.45	2.76	1.75
15/04/2017	31.00	22.82	26.0	23.73	8.18	1.12	-0.90	8.18
01/05/2017	31.00	28.58	27.5	26.93	2.42	0.62	1.65	2.42
17/05/2017	35.00	31.57	30.5	30.13	3.43	1.57	1.45	3.43
18/06/2017	33.00	29.59	29.0	28.93	3.41	0.49	0.66	3.41
04/07/2017	31.00	28.42	26.0	21.01	2.58	0.37	7.42	2.58
08/10/2017	31.00	27.53	27.0	26.57	3.47	0.63	0.96	3.47
01/03/2018	34.00	29.33	27.5	27.11	4.67	1.25	2.22	4.67
17/03/2018	31.00	27.13	26.0	25.45	3.87	0.62	1.67	3.87
02/04/2018	31.00	29.02	28.0	27.16	1.98	0.72	1.86	1.98
18/04/2018	34.00	29.85	28.0	27.18	4.15	1.12	2.67	4.15
04/05/2018	31.00	27.69	27.0	26.52	3.31	1.58	1.17	3.31
20/05/2018	31.00	28.67	28.0	27.79	2.33	0.32	0.87	2.33
05/06/2018	35.00	30.42	30.0	28.78	4.58	1.74	1.64	4.58
23/07/2018	35.00	30.67	29.5	29.30	4.33	1.46	1.37	4.33

08/08/2018	30.00	25.28	26.0	21.36	4.72	1.69	3.93	4.72
24/08/2018	35.50	31.01	30.0	29.20	4.49	1.09	1.81	4.49
09/09/2018	34.00	29.94	29.5	29.20	4.06	1.68	0.74	4.06
25/09/2018	32.50	28.85	28.5	27.88	3.65	0.90	0.98	3.65
12/11/2018	33.00	28.25	28.0	27.27	4.75	2.36	0.99	4.75
30/12/2018	30.00	25.80	25.0	24.50	4.20	1.33	1.29	4.20
31/01/2019	26.00	18.61	22.0	14.91	7.39	3.50	3.69	7.39
16/02/2019	32.00	28.97	27.5	27.05	3.03	0.95	1.93	3.03
21/04/2019	34.00	30.19	28.0	27.45	3.81	1.03	2.75	3.81
07/05/2019	32.00	29.87	28.5	28.09	2.13	0.37	1.78	2.13
23/05/2019	31.00	30.01	28.5	28.71	0.99	0.41	1.30	0.99
08/06/2019	33.00	30.85	29.5	29.09	2.15	0.59	1.77	2.15
24/06/2019	31.00	28.55	27.0	26.92	2.45	0.91	1.64	2.45
10/07/2019	29.00	26.70	25.5	24.78	2.30	0.41	1.92	2.30

7.2.2. Análisis estadístico de los resultados generales del período 2013-2019.

Para una mejor comprensión de los resultados que se obtuvieron en la presente investigación, se realizó un análisis estadístico, principalmente, una regresión y un análisis de varianzas (ANOVA) entre diferentes parámetros como: el comportamiento de las plumas térmicas, la relación existente entre la zona de descarga, la isoterma mínima y la obra de toma.

7.2.2.1. Comportamiento de la TsM en el período 2013-2019

En la Figura 12 se muestra el comportamiento de la TsM en las principales zonas de análisis de la PT de esta investigación: en la obra de toma, en la zona de descarga hacia la zona costera, en las isotermas mínimas que delimitan las plumas térmicas y en la temperatura ambiente del mar. También se pueden observar las temperaturas en el período 2013- 2019 y las correspondientes clasificaciones puntuales que adquieren las plumas térmicas; así como los rangos de temperatura que presentan cada una de las zonas de análisis mencionadas anteriormente.

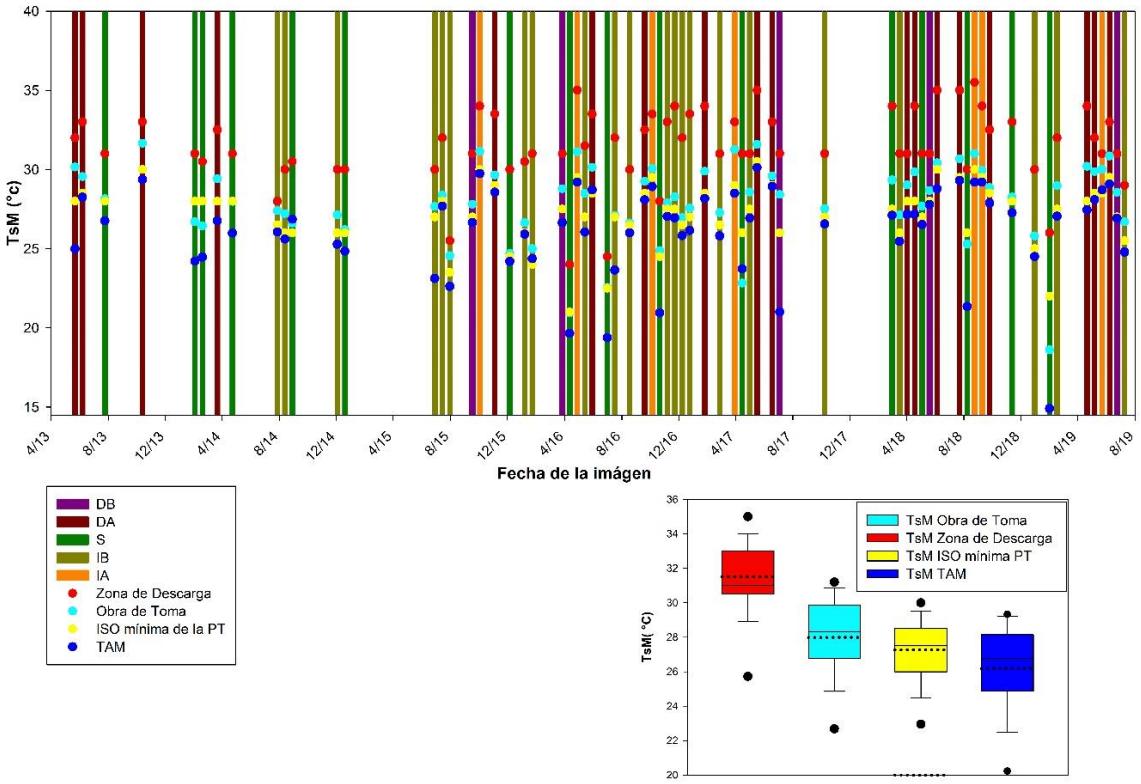


Figura 12. Comportamiento de la TsM en la OT, ZD, ISO mínima de la PT y TAM en el período 2013-2019

7.2.2.2. Relación entre la OT, ZD, ISO mínima y TAM

Como se había mencionado anteriormente, para determinar la relación que existía entre las diferentes zonas de análisis, se realizó un análisis estadístico general. En la Figura 13 se muestran las regresiones lineales entre la temperatura superficial de mar de la obra de toma versus las temperaturas superficiales del mar de la zona de descarga, temperatura ambiente del mar y la isotermas mínimas que conforman las plumas térmicas. Como se puede apreciar en las tres regresiones lineales se tienen coeficientes de correlación aceptables de r^2=0.70, r^2=0.80 y r^2=0.85 respectivamente, lo que demuestra que el 70%, 80% y 85% de las temperaturas que llegan a la obra de toma en el proceso los diferentes procesos de recirculación clasificados, son explicados por el modelo propuesto en la presente investigación. También en la Figura 13 se muestran los rangos de temperaturas superficiales del mar en la zona de descarga, obra de toma, temperatura ambiente del mar y las isotermas que conforman las plumas térmicas.

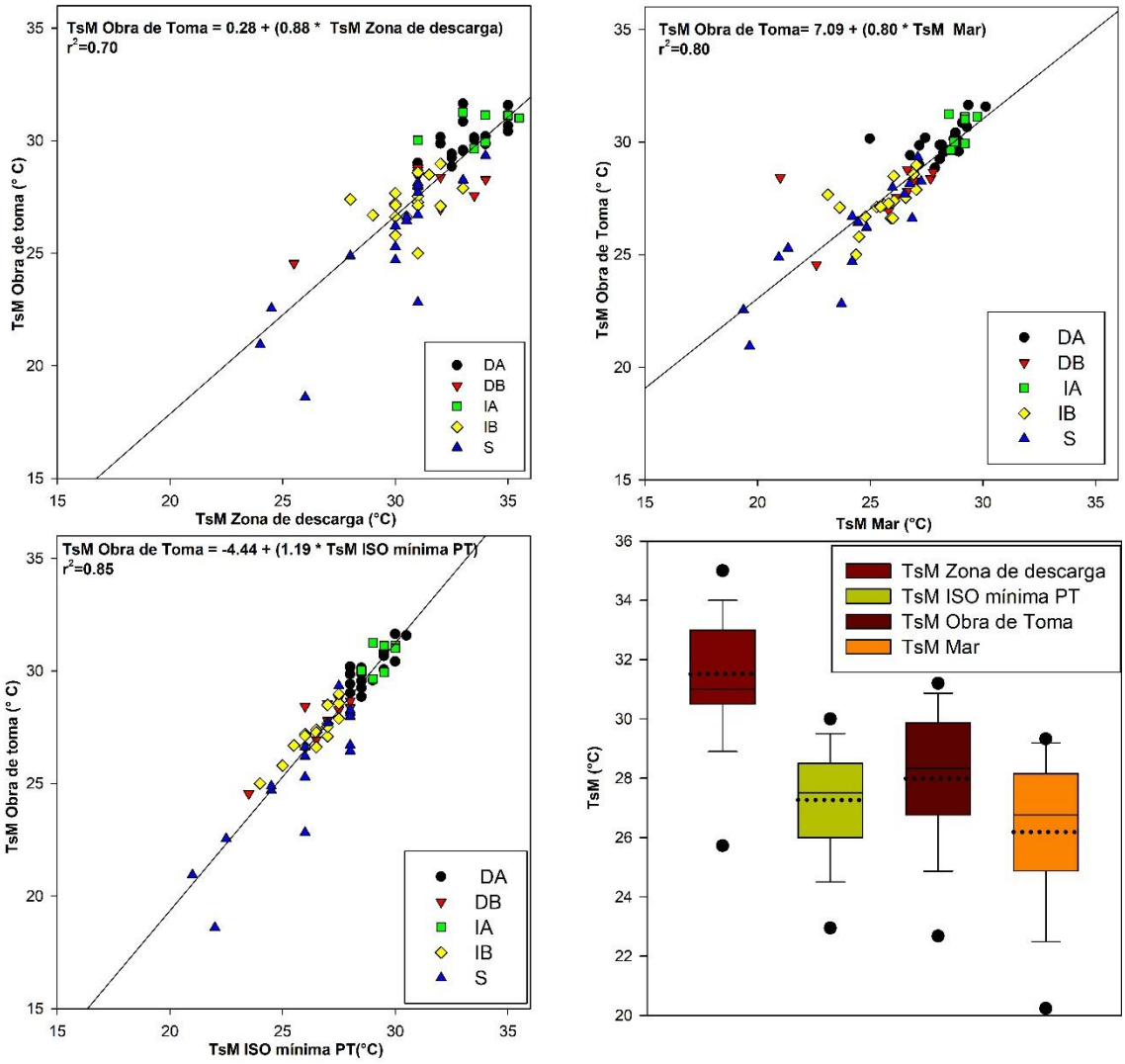


Figura 13. Regresiones lineales de la OT versus ZD, TAM, ISO mínima de las PsTs y los rangos térmicos asociados.

En la Tabla 10 a continuación, se muestran la población de imágenes utilizadas, los coeficientes de correlaciones lineales de Pearson y los coeficientes de determinaciones.

Tabla 10. Regresiones lineales y principales coeficientes de regresión

Regresiones Lineales				
	Parámetros	**N**	**R**	**R²**
OT vs	ZD	68	0.838	0.703
	TAM		0.895	0.801
	ISO mín PT		0.924	0.854

Posteriormente en la Tabla 11 se muestran los análisis de varianzas realizados entre las diferentes zonas de análisis (OT, ZD, TAM y ISO mín PT). Como resultado del ANOVA, se pueden observar los grados de libertad, la suma (SS) y media de cuadrados (MS), el valor estadístico de contraste (F), el p- valor asociado, la prueba de normalidad Shapiro-Wilk y la prueba de varianza constante.

En el caso del valor estadístico de contraste (F), se obtuvieron aceptables valores debido a que cuanto mayor sea el valor de F, mejor son las predicciones utilizando los modelos lineales; por lo que la relación entre las temperaturas superficiales del mar en la obra de toma en correspondencia con las isotermas mínimas que conforman las plumas térmicas presenta una mayor efectividad de predicción en su modelo lineal (F=385.768).

Por otra parte, en cuanto a la prueba de normalidad mediante la prueba Shapiro-Wilk, se obtuvo como resultado que en los tres casos los datos analizados las temperaturas superficiales del mar no vienen de una distribución normal, debido a que en los tres casos el p-valor es menor que el grado de significancia (p-valor (< 0.001) < α (0.05)).

En cuanto a la prueba de varianza constante, en dos de los tres casos se obtuvieron resultados favorables, o sea, que en los casos de TsM-OT vs TsM-ZD y TsM-OT vs TsM-ISO mín pasaron la prueba satisfactoriamente, con valores de 0.140 y 0.671 respectivamente. Lo que significa que estos dos modelos son los más fiables en este análisis debido a que, los errores de estimación son constantes a lo largo de las observaciones.

Tabla 11. Análisis de varianzas de las comparaciones realizadas.

ANOVA								
	Parámetros	**DF**	**SS**	**MS**	**F**	**P**	**Shapiro-Wilk**	**CVT**
OT vs	ZD	R 1	287.943	287.943	156.068	< 0.001	Falló (P < 0.001)	Pasó (P = 0.140)
		R 66	121.769	1.845				
		T 67	409.713	6.115				
	TAM	R 1	328.149	328.149	265.534	< 0.001	Falló (P < 0.001)	Falló (P = 0.019)
		R 66	81.563	1.236				
		T 67	409.713	6.115				
	ISO mín PT	R 1	349.857	349.857	385.768	< 0.001	Falló (P < 0.001)	Pasó (P = 0.671)
		R 66	59.856	0.907				
		T 67	409.713	6.115				
Power of performed test with alpha = 0.050 : 1.000								

7.2.2.3. Relación entre el área y la longitud de las plumas térmicas

En la presente investigación resultó interesante conocer si existía alguna relación entre el área y la longitud de las plumas térmicas. Por lo que se realizó un análisis estadístico con el objetivo de caracterizar y conocer esta posible relación. En la Figura 14 se muestra la regresión exponencial obtenida entre el área y la longitud de las plumas térmicas, la cual presenta un grado de ajuste de r^2= 0.65. Por lo que en el 65% de las observaciones el área de la pluma térmica está influenciada por la longitud de la pluma térmica.

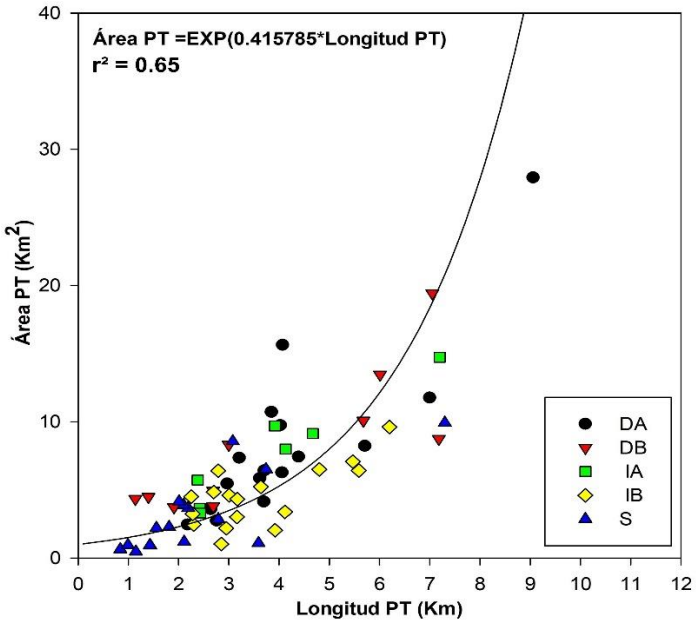


Figura 14. Regresión exponencial entre el área y la longitud de la pluma térmica.

Por otra parte, en la Tabla 12 y se muestran los principales coeficientes de la regresión exponencial y el análisis de varianza respectivamente. En este caso se obtuvieron el coeficiente de Pearson (r=0.81) y el coeficiente de correlación (r^2=0.65) en rangos aceptables, lo que evidencia la existencia de una asociación y correlación positiva entre el área y la longitud de las plumas térmicas.

Tabla 12. Principales coeficientes de la regresión exponencial (Área vs Longitud PT).

Regresión Exponencial			
Parámetros	**N**	**R**	**R²**
Área PT vs Longitud PT	68	0.8067	0.6508

En cuanto a los resultados obtenidos en el ANOVA (Tabla 13), se puede observar un valor del estadístico F=123.0095 y un p-valor asociado menor que 0.0001, lo que conduce a

rechazar la hipótesis nula de no linealidad. Por tanto, existe una relación lineal significativa entre el área y la longitud de las plumas térmicas.

Según las pruebas de normalidad y varianza constante, se obtuvieron resultados fallidos en ambas pruebas, lo que significa que los datos de temperatura superficial del mar no presentan una distribución normal y que los errores de estimación no son constantes a lo largo de las observaciones.

Tabla 13. Análisis de varianza (Área PT vs Longitud PT)

ANOVA								
	Parámetros	**DF**		**SS**	**MS**	**F**	**P**	**Shapiro-Wilk**	**CVT**
Área PT	**vs Longitud PT**	R	1	1728.5	1728.5	123.0095	< 0.0001	Falló (P < 0.0001)	Falló (P < 0.0001)
		R	66	927.4	14.052				
		T	67	2655.9	39.6413				

7.2.2.4. Relación entre la dirección de las PsTs y la dirección de las CM.

Uno de los principales objetivos de la presente investigación fue la determinación de el o los factores que pueden estar influyendo en el comportamiento de la dirección de la dispersión de las plumas térmicas. Por tanto, analizar la relación existente entre la dirección de las plumas térmicas y la dirección de las corrientes marinas resultó de vital importancia. En la Figura 15 se observa el gráfico de comparación entre estos dos parámetros, así como la ecuación que describe la regresión lineal; mientras que en la Tabla 14 se exponen los coeficientes asociados a esta.

Tabla 14. Principales coeficientes de la regresión lineal (Dirección PT vs Dirección CM.)

Regresión Lineal			
Parámetros	**N**	**R**	**R^2**
Dirección PT vs Dirección CM	68	0.959	0.919

Como se pueden apreciar, los coeficientes de Pearson y de correlación lineal fueron los mejores obtenidos en esta investigación con 0.959 y 0.919, lo que demuestra una fuerte asociación y correlación entre la dirección de las plumas térmicas y la dirección de las corrientes marinas.

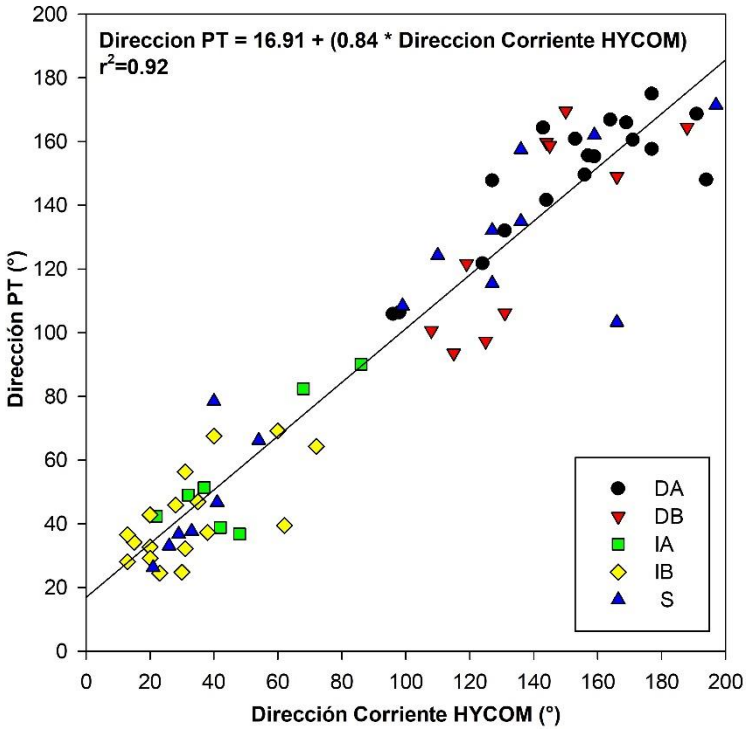


Figura 15. Regresión lineal entre la dirección de dispersión de las PT y la dirección de las CM.

Por otra parte, el análisis de varianza que se encuentra a continuación en la Tabla 15, muestra el mayor valor estadístico F (750.719) de todos los parámetros comparados y analizados en la presente investigación. Además de presentar un p-valor asociado menor que 0.001; lo que demuestra la existencia de una fuerte y significativa relación lineal entre la dirección de la dispersión de las plumas térmicas y la dirección de las corrientes marinas.

Tabla 15. Análisis de varianza (Dirección PT vs Dirección CM).

ANOVA								
Parámetros		**DF**		**SS**	**MS**	**F**	**P**	**Shapiro-Wilk**	**CVT**
Dir. PT	**vs Dir. CM**	R	1	169108.9	169108.9	750.719	< 0.001	Falló (P < 0.001)	Pasó (P = 0.062)
		R	66	14867.3	225.262				
		T	67	183976.2	2745.9				

En cuanto a las pruebas de normalidad y varianza constante, se obtuvo un resultado fallido en la prueba de normalidad y un resultado favorable en la prueba de varianza constante. Por lo que, en este caso, los datos asociados a las direcciones de las plumas térmicas y a las direcciones de las corrientes marinas no presentan una distribución normal, pero si constituye un modelo fiable en el análisis debido a que los errores de estimación son constantes a lo largo de las observaciones.

Debido a los óptimos resultados estadísticos obtenidos en la comparación y relación entre estos parámetros, se realizó un análisis más profundo de la relación que existe entre los mismo mediante un Análisis Direccional Circular; debido a que las observaciones de estos parámetros constituyen datos circulares. Los resultados obtenidos en este ADC se muestran en el epígrafe 7.2.5. Análisis Direccional.

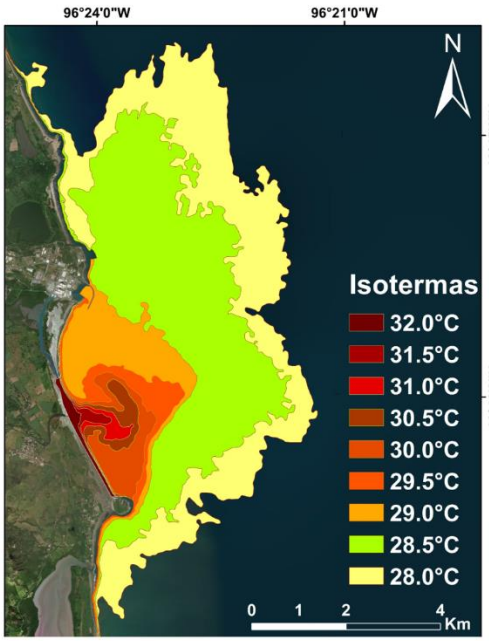
7.2.3. Plumas térmicas y parámetros geométricos estadísticos obtenidos como resultado del modelo.

A continuación, se muestran las plumas térmicas, así como sus parámetros geométricos y estadísticos para cada una de las imágenes del período 2013-2019 obtenidas del satélite Landsat 8 y procesadas y modeladas en los softwares Terrset y ArcGIS.

En cuanto a los parámetros geométricos y estadísticos determinados para el estudio de forma, dimensión y dirección de la dispersión de las plumas térmicas, las tablas asociadas a cada pluma térmica muestran tanto los parámetros específicos de cada polígono (límite que está constituido por cada isoterma) como los parámetros generales que la caracterizan. A continuación se realiza un análisis anual de las características específicas de las plumas térmicas en el período 2013-2019.

Año 2013

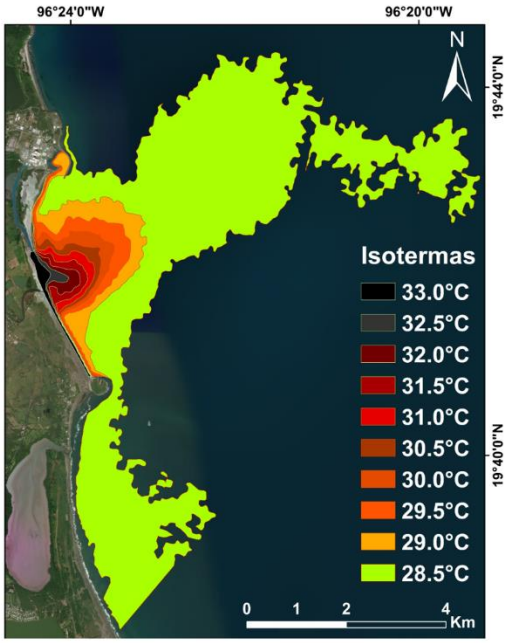
En el año 2013 se obtuvieron del satélite Landsat 8 solo cuatro imágenes para la presente investigación, por lo que el análisis en este año se ve limitado por la cantidad de imágenes representativas necesarias para las diferentes estaciones del año. En este año las cuatro imágenes pertenecen a los meses de mayo, junio, julio y octubre, los cuales están dentro del período de lluvias que corresponde los meses de junio a octubre. En cuanto a las dimensiones espaciales de las plumas térmicas resalta el área de la PT del 22 de mayo (Figura 16) con 40.8 km² y el perímetro que alcanza la PT del 7 de junio (Figura 17) con 100.4 km.



Pluma Térmica 22 de mayo de 2013 (2446)					
Isotermas	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
32	0.28	7.79	114.98		
31.5	0.19	6.61	114.75		
31	0.35	13.06	117.96		
30.5	0.74	18.17	104.86		
30	1.55	20.21	100.68		
29.5	1.38	25.75	101.53		
29	3.79	32.74	103.68		
28.5	17.81	71.61	102.58		
28	13.88	98.16	93.41		
Pluma Térmica	**40.83**	**72.19**	**91.48**	**5.30**	**2.45**

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
32.0	31.13	37.47	6.34	33.29	1.39
31.5	30.82	32.02	1.20	31.64	0.25
31.0	30.39	31.61	1.22	31.13	0.23
30.5	30.06	31.19	1.13	30.71	0.19
30.0	29.64	30.56	0.92	30.15	0.19
29.5	29.07	30.31	1.23	29.69	0.16
29.0	28.35	29.64	1.29	29.23	0.14
28.5	27.80	29.07	1.27	28.64	0.10
28.0	27.09	28.57	1.48	28.27	0.16
Pluma Térmica	27.09	37.47	10.38	28.81	0.83

Figura 16. Características de la Pluma Térmica obtenida el 22 de mayo del 2013.



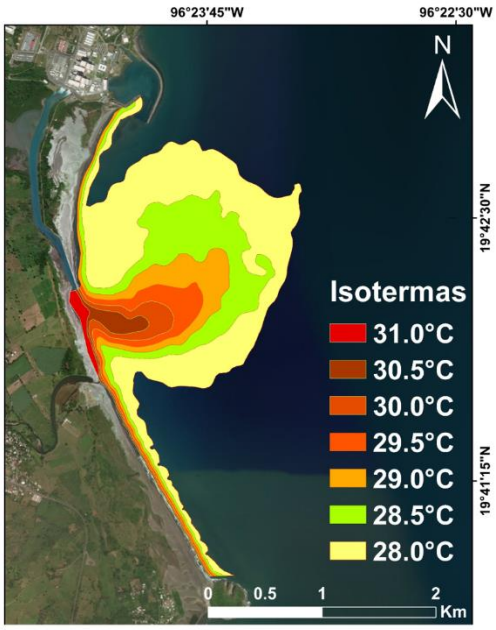
Pluma Térmica 07 de junio de 2013					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
33.0	0.21	7.67	113.71		
32.5	0.12	5.07	108.66		
32.0	0.24	6.51	109.85		
31.5	0.31	9.56	105.03		
31.0	0.37	11.94	108.90		
30.5	0.33	9.48	107.40		
30.0	0.58	14.77	108.13		
29.5	1.66	21.06	93.98		
29.0	0.92	18.39	106.26		
28.5	21.84	101.41	66.30		
Pluma Térmica	27.92	100.38	65.05	4.19	2.12

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
33.0	33.03	38.83	5.80	34.79	1.32
32.5	32.46	33.26	0.81	32.77	0.18
32.0	31.96	32.78	0.82	32.25	0.17
31.5	31.41	33.04	1.63	31.81	0.23
31.0	30.36	31.80	1.44	30.79	0.21
30.5	30.91	32.24	1.33	31.30	0.21
30.0	29.87	31.20	1.32	30.27	0.19
29.5	28.76	29.84	1.08	29.22	0.16
29.0	29.37	30.58	1.21	29.75	0.17
28.5	28.32	29.59	1.27	28.68	0.16
Pluma Térmica	28.32	38.83	10.51	29.07	1.03

Figura 17. Características de la Pluma Térmica obtenida el 7 de junio del 2013.

Respecto a la dirección de la dispersión de las plumas térmicas, todas se orientan hacia el noreste, pudiendose observar un proceso de recirculación hacia la obra de tomas del 75% de las imágenes en este año, o sea, solo la imagen del 25 de julio (Figura 18) no presenta un proceso de recirculación. Por otra parte comparando las temperaturas máximas y

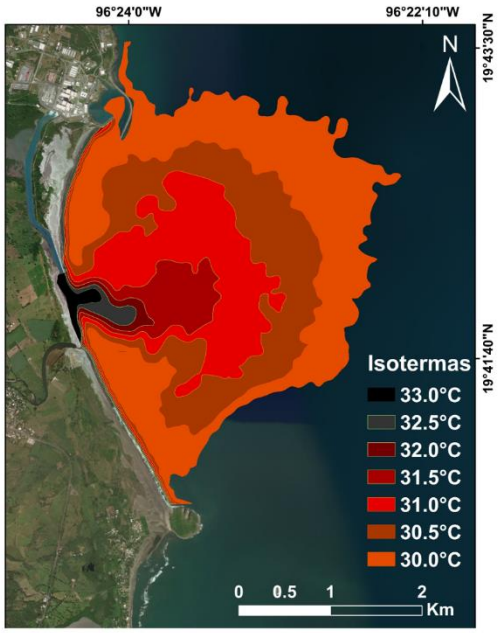
mínimas de las isotermas que conforman las plumas térmicas, resulta de importancia destacar que la PT del 13 de octubre (Figura 19) presenta una isoterma máxima de 33.0°C, una isoterma mínima de 30.0°C, una temperatura promedio de 30.8°C con una razón de dispersión de 0.75°C.



Pluma Térmica 25 de julio de 2013 (2446)					
Isotermas	Área (Km^2)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31°C	0.05	2.08	105.97		
30.5°C	0.10	8.84	107.54		
30°C	0.16	10.59	101.47		
29.5°C	0.24	11.74	89.65		
29°C	0.40	17.46	92.73		
28.5°C	0.85	21.39	89.45		
28°C	1.73	23.29	90.95		
Pluma Térmica	**3.67**	**17.72**	**86.76**	**1.34**	**0.87**

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.0	31.30	34.04	2.74	32.40	0.69
30.5	30.46	31.56	1.09	30.88	0.28
30.0	29.98	31.03	1.05	30.33	0.23
29.5	29.48	30.62	1.13	29.82	0.21
29.0	28.94	29.97	1.03	29.30	0.20
28.5	28.45	29.32	0.87	28.73	0.17
28.0	27.90	28.72	0.82	28.24	0.15
Pluma Térmica	27.90	34.04	6.14	28.89	0.97

Figura 18. Características de la Pluma Térmica obtenida el 25 de julio del 2013.



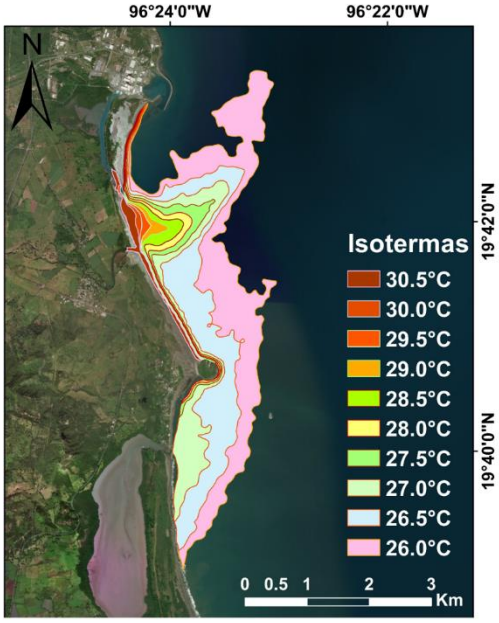
Pluma Térmica 13 de octubre de 2013 (2447)					
Isotermas	Área (Km^2)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
33°C	0.10	2.71	107.72		
32.5°C	0.14	8.72	106.54		
32°C	0.15	10.37	105.33		
31.5°C	0.70	18.37	125.56		
31°C	2.18	29.32	118.47		
30.5°C	2.85	36.47	100.06		
30°C	4.28	35.57	76.42		
Pluma Térmica	**10.71**	**25.47**	**80.07**	**2.00**	**1.71**

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
33.0	32.77	36.82	4.06	34.00	1.05
32.5	32.00	33.14	1.13	32.68	0.21
32.0	31.57	32.59	1.02	32.14	0.23
31.5	31.09	32.13	1.04	31.74	0.19
31.0	30.65	31.64	0.99	31.19	0.14
30.5	30.25	31.19	0.94	30.75	0.16
30.0	29.65	30.61	0.96	30.21	0.16
Pluma Térmica	29.65	36.82	8.31	30.81	0.75

Figura 19. Características de la Pluma Térmica obtenida el 13 octubre del 2013.

Año 2014

En el año 2014 se obtuvieron del satélite Landsat 8 un total de 9 imágenes, las cuales pertenecen a los meses de febrero, marzo, abril, julio, agosto y diciembre. En este caso si contamos con representación de imágenes en los dos períodos analizados, teniendo dos imágenes en el período de lluvias y siete imágenes en el período de secas. En cuanto a las dimensiones espaciales de las plumas térmicas, el área de las misma se encuentra entre 0.91 y 8.56 km², siendo la PT del 29 de agosto la de mayor área (Figura 20) y el perímetro oscila entre 11.03 y 40.56 km, siendo la PT del 13 de agosto la de mayor perímetro (Figura 21).

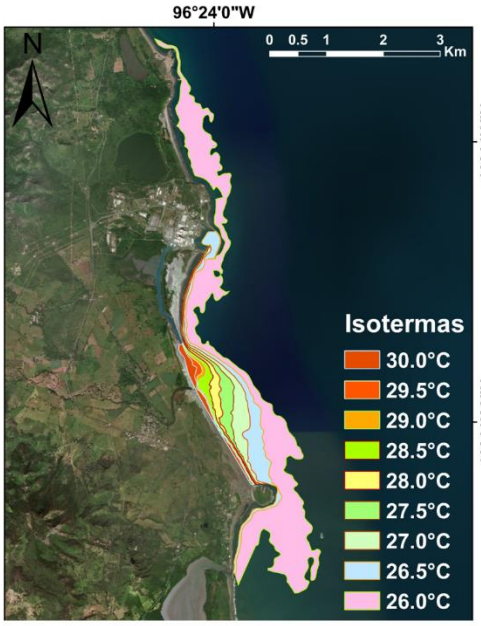


Pluma Térmica 29 de agosto de 2014 (2446)

Isotermas	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
30.5°C	0.15	7.52	114.59		
30.0°C	0.06	7.20	111.91		
29.5°C	0.07	7.60	110.06		
29.0°C	0.11	8.46	107.24		
28.5°C	0.20	9.64	102.50		
28.0°C	0.26	14.14	109.78		
27.5°C	0.31	15.32	99.49		
27.0°C	0.50	17.30	85.27		
26.5°C	3.51	28.57	90.14		
26.0°C	3.41	37.77	89.51		
Pluma Térmica	**8.56**	**33.29**	**92.35**	**3.18**	**0.86**

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
30.5°C	30.62	34.77	4.15	32.25	1.02
30.0°C	30.06	31.28	1.22	30.54	0.32
29.5°C	29.51	30.74	1.22	29.94	0.28
29.0°C	28.98	30.08	1.10	29.40	0.28
28.5°C	28.45	29.50	1.04	28.81	0.22
28.0°C	27.98	32.44	4.46	28.62	0.71
27.5°C	27.44	28.35	0.91	27.79	0.19
27.0°C	27.00	27.74	0.74	27.28	0.16
26.5°C	26.50	35.09	8.59	27.11	1.05
26.0°C	25.95	31.11	5.17	26.26	0.27
Pluma Térmica	25.95	34.77	8.82	26.96	1.10

Figura 20. Características de la Pluma Térmica obtenida el 29 de agosto del 2014.



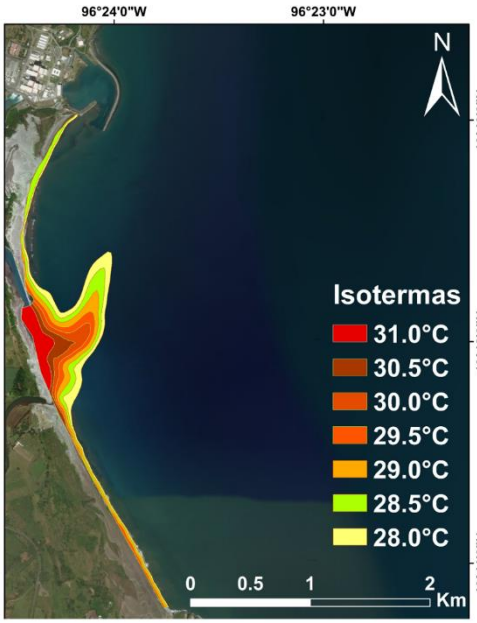
Pluma Térmica 13 de agosto de 2014 (2446)

Isotermas	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
30.0°C	0.15	7.59	114.86		
29.5°C	0.06	7.66	112.33		
29.0°C	0.07	7.82	111.26		
28.5°C	0.13	7.88	109.79		
28.0°C	0.17	8.01	107.47		
27.5°C	0.31	12.57	104.73		
27.0°C	0.43	12.86	105.96		
26.5°C	0.73	19.43	101.07		
26.0°C	3.60	39.47	100.72		
Pluma Térmica	**6.50**	**40.56**	**100.63**	**3.78**	**0.55**

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
30.0°C	29.73	33.33	3.60	31.03	0.81
29.5°C	29.31	29.99	0.67	29.69	0.16
29.0°C	28.84	29.53	0.69	29.18	0.18
28.5°C	28.33	29.05	0.72	28.65	0.16
28.0°C	27.88	28.55	0.67	28.22	0.15
27.5°C	27.06	28.07	1.01	27.70	0.17
27.0°C	26.71	27.58	0.86	27.20	0.16
26.5°C	26.24	27.08	0.84	26.69	0.17
26.0°C	25.85	26.85	1.00	26.15	0.13
Pluma Térmica	25.85	34.25	8.40	27.11	1.50

Figura 21. Características de la Pluma Térmica obtenida el 13 de agosto del 2014.

En cuanto a la dirección de la dispersión cinco plumas térmicas se orientan hacia el noreste (2 de febrero (Figura 22), 22 de marzo, 23 de abril (Figura 23), 29 de agosto y 19 de diciembre (Figura 24)), tres plumas térmicas se orientan hacia el sureste (28 de julio (Figura 25), 13 de agosto y 3 de diciembre (Figura 26)) y una pluma térmica se orienta hacia el este (18 de febrero (Figura 27)).

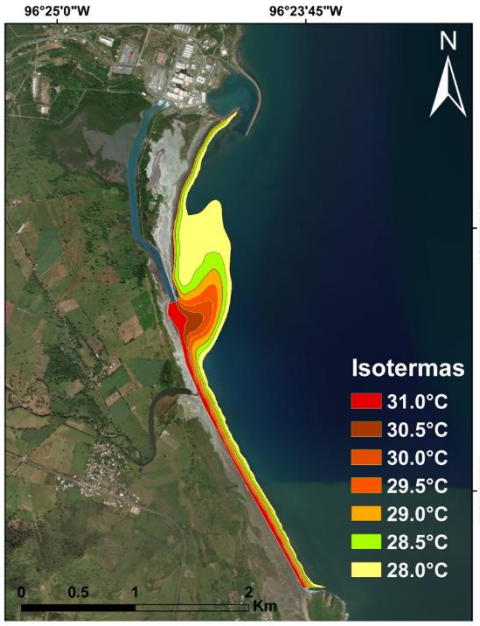


Pluma Térmica 02 de febrero de 2014 (2446)

Isotermas	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31.0°C	0.07	2.05	107.03		
30.5°C	0.05	3.53	98.67		
30.0°C	0.06	4.54	89.93		
29.5°C	0.08	9.55	106.51		
29.0°C	0.09	10.61	103.73		
28.5°C	0.14	14.29	101.50		
28.0°C	0.14	14.86	98.81		
Pluma Térmica	**0.63**	**13.53**	**101.07**	**0.83**	**0.24**

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.0	31.08	33.60	2.52	31.96	0.65
30.5	30.53	32.25	1.71	30.90	0.30
30.0	29.99	30.96	0.97	30.35	0.19
29.5	29.50	31.26	1.76	30.00	0.36
29.0	28.99	29.92	0.93	29.38	0.20
28.5	28.47	31.99	3.52	29.05	0.55
28.0	27.95	28.99	1.04	28.38	0.23
Pluma Térmica	27.95	33.60	5.65	29.69	1.18

Figura 22. Características de la Pluma Térmica obtenida el 2 de febrero del 2014.

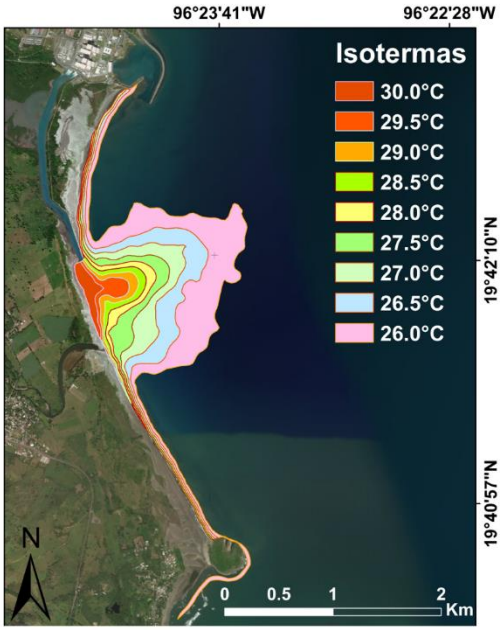


Pluma Térmica 23 de abril de 2014 (2446)

Isotermas	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31.0°C	0.09	7.54	114.90		
30.5°C	0.05	7.73	111.62		
30.0°C	0.06	8.19	108.96		
29.5°C	0.07	8.73	106.83		
29.0°C	0.11	13.26	102.99		
28.5°C	0.15	13.69	102.91		
28.0°C	0.33	13.83	101.43		
Pluma Térmica	**0.94**	**13.14**	**102.33**	**1.29**	**0.23**

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.0	31.11	34.41	3.30	32.49	0.73
30.5	30.55	31.83	1.28	31.07	0.34
30.0	30.04	31.22	1.18	30.50	0.31
29.5	29.45	30.66	1.21	29.98	0.30
29.0	28.95	30.12	1.17	29.47	0.27
28.5	28.46	29.50	1.04	28.92	0.24
28.0	28.00	28.87	0.87	28.33	0.18
Pluma Térmica	28.00	34.41	6.17	29.49	1.34

Figura 23. Características de la Pluma Térmica obtenida el 23 de abril del 2014.

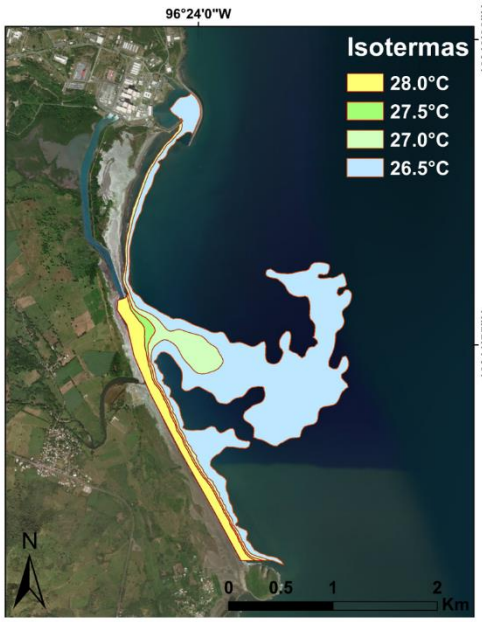


Pluma Térmica 19 de diciembre de 2014 (2446)

Isotermas	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
30.0°C	0.06	2.06	106.22		
29.5°C	0.07	3.87	91.40		
29.0°C	0.07	4.87	86.76		
28.5°C	0.07	5.67	88.66		
28.0°C	0.11	8.88	100.11		
27.5°C	0.20	12.61	101.47		
27.0°C	0.39	15.17	98.04		
26.5°C	0.28	14.23	99.24		
26.0°C	0.80	20.72	97.79		
Pluma Térmica	**2.20**	**19.64**	**100.51**	**1.32**	**0.53**

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
30.0°C	29.94	31.50	1.56	30.67	0.41
29.5°C	29.39	30.06	0.66	29.75	0.17
29.0°C	28.88	29.60	0.72	29.22	0.16
28.5°C	28.37	29.08	0.71	28.72	0.17
28.0°C	27.89	28.55	0.66	28.22	0.16
27.5°C	27.32	28.09	0.77	27.71	0.16
27.0°C	26.33	27.15	0.82	26.73	0.16
26.5°C	26.84	27.67	0.83	27.24	0.17
26.0°C	25.83	26.67	0.84	26.23	0.15
Pluma Térmica	25.73	31.41	5.68	27.16	1.17

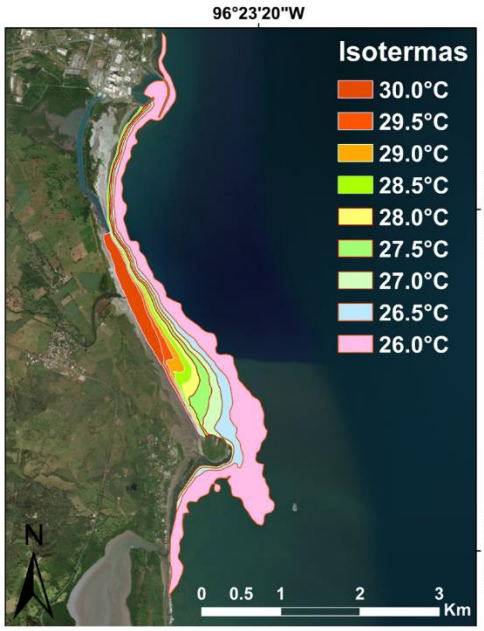
Figura 24. Características de la Pluma Térmica obtenida el 19 de diciembre del 2014.



Pluma Térmica 28 de julio de 2014 (2446)					
Isotermas	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
28.0°C	0.25	7.82	117.56		
27.5°C	0.06	7.87	115.60		
27.0°C	0.27	14.53	106.97		
26.5°C	1.66	28.60	103.83		
Pluma Térmica	**2.46**	**28.20**	**107.78**	**1.16**	**0.68**

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
28.0	27.63	33.49	5.86	29.60	1.43
27.5	27.22	27.93	0.71	27.53	0.17
27.0	26.71	27.52	0.81	27.14	0.18
26.5	26.24	27.02	0.78	26.61	0.11
Pluma Térmica	26.24	35.28	9.04	27.40	1.57

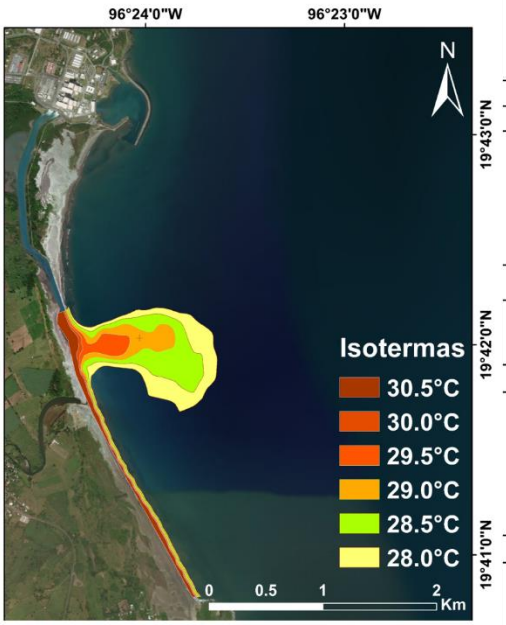
Figura 25. Características de la Pluma Térmica obtenida el 28 de julio del 2014.



Pluma Térmica 03 de diciembre de 2014 (2446)					
Isotermas	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
30.0°C	0.28	7.54	114.40		
29.5°C	0.08	7.66	113.17		
29.0°C	0.10	8.06	113.93		
28.5°C	0.14	12.25	108.77		
28.0°C	0.12	12.20	107.52		
27.5°C	0.21	12.44	109.94		
27.0°C	0.26	16.10	109.29		
26.5°C	0.37	16.62	109.80		
26.0°C	1.48	26.18	102.94		
Pluma Térmica	**3.38**	**28.59**	**105.82**	**2.16**	**0.50**

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
30.0	30.01	34.01	4.00	31.45	1.04
29.5	29.48	30.18	0.70	29.82	0.15
29.0	28.99	29.68	0.68	29.32	0.15
28.5	27.86	28.66	0.80	28.27	0.16
28.0	28.47	29.11	0.64	28.79	0.16
27.5	27.46	28.09	0.63	27.78	0.15
27.0	26.92	27.56	0.64	27.25	0.15
26.5	26.43	27.13	0.70	26.74	0.15
26.0	25.97	27.46	1.48	26.22	0.20
Pluma Térmica	25.99	34.01	8.02	27.51	1.72

Figura 26. Características de la Pluma Térmica obtenida el 3 de diciembre del 2014.



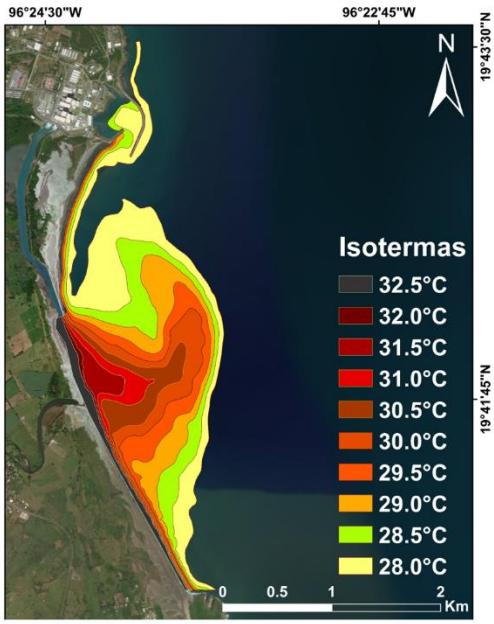
Pluma Térmica 18 de febrero de 2014 (2446)

Isotermas	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
30.5°C	0.10	7.50	115.09		
30.0°C	0.03	7.47	114.13		
29.5°C	0.09	8.55	107.07		
29.0°C	0.15	10.64	97.90		
28.5°C	0.28	12.50	103.73		
28.0°C	0.28	13.77	90.62		
Pluma Térmica	**0.91**	**11.03**	**101.86**	**0.66**	**0.44**

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
30.5	30.92	34.79	3.87	32.64	0.90
30.0	30.13	31.46	1.33	30.89	0.38
29.5	29.48	30.97	1.49	29.94	0.38
29.0	28.98	30.48	1.50	29.33	0.33
28.5	28.43	29.86	1.43	28.81	0.24
28.0	27.94	29.28	1.34	28.33	0.25
Pluma Térmica	27.94	34.79	6.85	29.32	1.35

Figura 27. Características de la Pluma Térmica obtenida el 18 de febrero del 2014.

En este año 2014, se observó el proceso de recirculación hacia la obra de tomas en cuatro plumas térmicas (22 de marzo, 28 de julio, 13 de agosto y 3 de diciembre), pero solo en la PT del 22 de marzo se alcanzan rangos de temperaturas considerables que oscilan entre los 28.5°C y los 28.0°C (Figura 28), debido a que en las demás plumás térmicas se alcanzan valores menores de 26.5°C, 26.5°C y 26.0°C respectivamente.



Pluma Térmica 22 de marzo de 2014 (2446)					
Isotermas	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
32.5°C	0.13	7.45	115.23		
32.0°C	0.04	7.39	113.99		
31.5°C	0.12	7.95	111.92		
31.0°C	0.14	9.06	109.07		
30.5°C	0.27	10.36	92.00		
30.0°C	0.32	11.93	76.91		
29.5°C	0.40	17.37	94.71		
29.0°C	0.51	18.07	96.71		
28.5°C	0.56	19.48	101.42		
28.0°C	0.88	21.67	101.26		
Pluma Térmica	**3.57**	**20.92**	**98.50**	**1.88**	**0.60**

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
32.5	32.79	37.29	4.49	34.68	1.11
32.0	32.05	33.38	1.33	32.66	0.31
31.5	31.26	32.63	1.37	31.76	0.29
31.0	30.97	32.37	1.40	31.37	0.27
30.5	30.45	31.72	1.27	30.80	0.20
30.0	29.88	31.26	1.37	30.29	0.20
29.5	29.44	30.51	1.07	29.81	0.20
29.0	28.97	30.04	1.07	29.30	0.18
28.5	28.43	29.40	0.97	28.80	0.17
28.0	27.92	28.79	0.87	28.26	0.16
Pluma Térmica	27.92	37.29	9.63	29.73	1.57

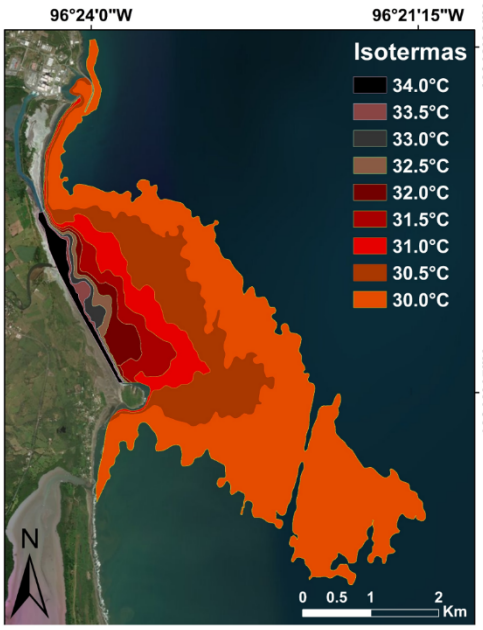
Figura 28. Características de la Pluma Térmica obtenida el 22 de marzo del 2014.

En cuanto a las temperaturas máximas y mínimas de las isotermas que conforman las plumas térmicas, se pudo observar que la PT del 22 de marzo presenta una isoterma máxima de 32.5°C, una isoterma mínima de 28°C y una temperatura promedio de 29.7°C con una razón de dispersión de 1.57°C (Figura 28). Por otra parte, en este año existen cuatro plumas térmicas (13 y 29 de agosto, 3 y 19 de diciembre) que presentan una isoterma mínima de 26°C.

Año 2015

En el año 2015 se obtuvieron un total de 7 imágenes satelitales, las mismas pertenecen a los meses de junio, julio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre. En este año si existe una disponibilidad de imágenes en los dos períodos analizados, dos imágenes en el período de secas y cinco imágenes en el período de lluvias. En cuanto a las dimensiones espaciales de las plumas térmicas, el área y el perímetro de las mismas oscila de 1.09 km² a 14.73 km² y de 17.21 km a 51.29 km, siendo la PT del 3 de octubre la de mayor área y perímetro (Figura 29).

En cuanto a la dirección de la dispersión, tres plumas térmicas se orientan hacia el este (26 de junio, 15 y 31 de julio), dos plumas térmicas se orientan hacia el sureste (3 de octubre y 6 de diciembre) y las plumas térmicas del 17 de septiembre y 4 de noviembre se orientan hacia el norte y noreste respectivamente.



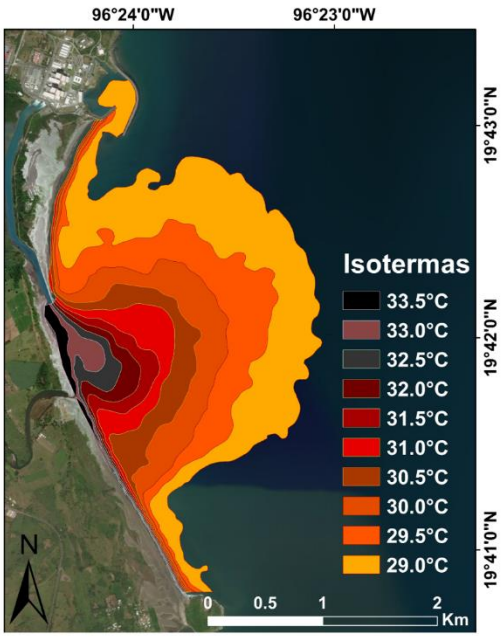
Pluma Térmica 03 de octubre de 2015

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
34.0	0.29	7.58	114.32		
33.5	0.11	6.89	112.30		
33.0	0.16	7.26	112.67		
32.5	0.17	7.99	112.99		
32.0	0.42	9.08	115.15		
31.5	0.69	14.01	118.33		
31.0	1.11	18.03	120.77		
30.5	2.94	26.97	120.33		
30.0	8.43	57.00	123.45		
Pluma Térmica	14.73	51.29	127.71	3.67	1.28

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
34.0	34.03	39.41	5.38	36.05	1.27
33.5	33.47	34.41	0.94	33.90	0.22
33.0	32.95	34.04	1.09	33.35	0.21
32.5	32.47	33.38	0.91	32.83	0.18
32.0	31.96	32.72	0.77	32.29	0.16
31.5	31.48	32.42	0.94	31.78	0.17
31.0	30.97	31.89	0.93	31.27	0.16
30.5	30.46	31.72	1.26	30.73	0.14
30.0	29.88	31.86	1.98	30.23	0.18
Pluma Térmica	29.84	39.41	9.57	30.83	1.17

Figura 29. Características de la Pluma Térmica obtenida el 3 de octubre del 2015.

En este año 2015 si se observó el proceso de recirculación a la obra de toma en seis plumas térmicas (86% de las imágenes del año 2015), principalmente en la PT del 3 de octubre y en la PT del 4 de noviembre (Figura 30); destacando que en la PT del 3 de octubre a pesar de que se orienta hacia el sureste sus isotermas costeras llegan a influir en la obra de toma con unas temperaturas que oscilan entre 30.5°C y 30.0°C. En el caso de las pumas térmicas del 29 de junio (Figura 31), 15 de julio (Figura 32), 31 de julio (Figura 35) y 17 de septiembre (Figura 33) si presentan recirculación hacia la obra de toma pero la intensidad de las isotermas que llegan son de 27.0°C, 28.0°C, 24.0°C y 27.0°C respectivamente, siendo las mismas istotermas de poca intensidad térmica; mientras que en la pluma térmica del 6 de diciembre (Figura 34) se pudo apreciar que sus isotermas costeras no llegan a incidir en la obra de toma.

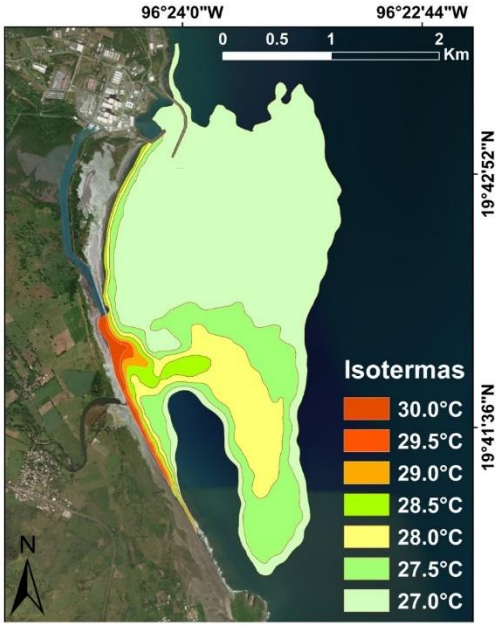


Pluma Térmica 04 de noviembre de 2015

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
33.5	0.07	3.49	108.66		
33.0	0.11	7.92	109.75		
32.5	0.13	8.91	108.01		
32.0	0.16	9.22	104.27		
31.5	0.19	9.64	100.72		
31.0	0.49	14.37	99.41		
30.5	0.38	13.87	99.48		
30.0	0.74	15.63	101.26		
29.5	1.12	18.32	112.85		
29.0	2.19	21.96	110.50		
Pluma Térmica	5.72	19.33	99.70	1.66	1.10

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
33.5	33.69	36.02	2.33	34.64	0.59
33.0	32.87	34.27	1.40	33.39	0.31
32.5	32.48	33.66	1.18	32.86	0.23
32.0	31.99	33.35	1.35	32.36	0.26
31.5	31.51	32.70	1.19	31.83	0.23
31.0	30.33	31.56	1.24	30.78	0.20
30.5	31.00	32.10	1.10	31.34	0.19
30.0	29.97	30.98	1.02	30.28	0.17
29.5	29.47	30.35	0.88	29.73	0.16
29.0	28.85	29.70	0.85	29.24	0.15
Pluma Térmica	28.85	36.16	7.31	30.21	1.23

Figura 30. Características de la Pluma Térmica del 4 de noviembre del 2015.

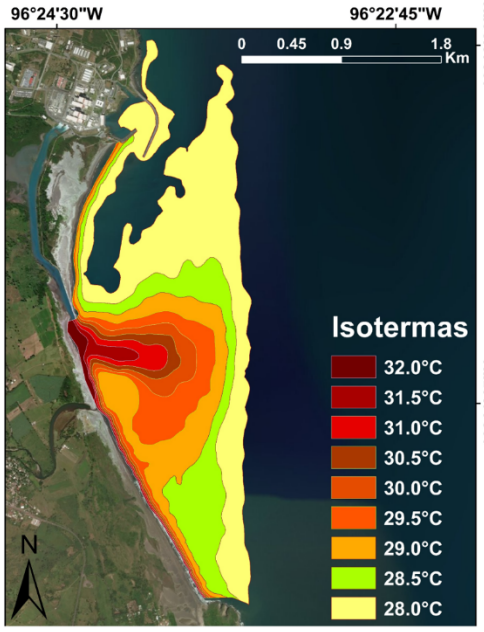


Pluma Térmica 29 de junio de 2015

Isotermas (°C)	Area (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
30.0	0.07	4.58	110.37		
29.5	0.04	4.81	107.97		
29.0	0.06	5.28	106.40		
28.5	0.18	12.18	103.02		
28.0	0.79	17.54	124.99		
27.5	1.14	23.61	113.40		
27.0	3.94	29.70	90.90		
Pluma Térmica	6.40	23.51	93.88	1.98	1.03

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
30.0	30.09	31.33	1.24	30.68	0.31
29.5	29.54	30.39	0.86	29.97	0.20
29.0	29.01	29.75	0.74	29.40	0.19
28.5	28.47	29.62	1.16	28.83	0.24
28.0	27.91	28.94	1.03	28.30	0.18
27.5	27.36	28.61	1.26	27.77	0.16
27.0	26.80	28.13	1.33	27.23	0.14
Pluma Térmica	26.83	31.55	4.71	27.63	0.68

Figura 31. Características de la Pluma Térmica obtenida el 29 de junio del 2015.

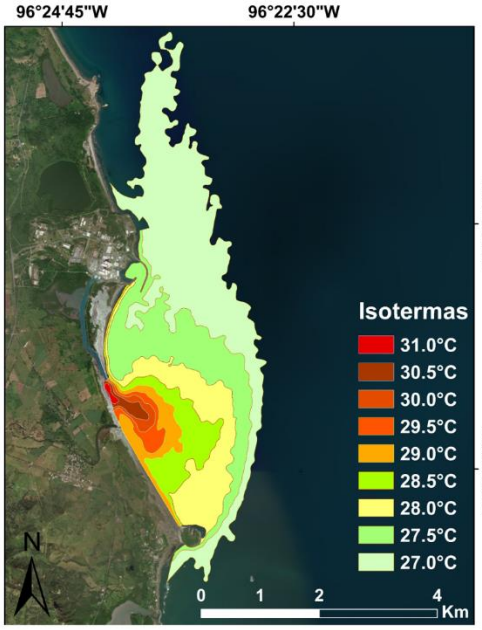


Pluma Térmica 15 de julio de 2015

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
32.0	0.05	2.04	107.89		
31.5	0.09	8.61	111.07		
31.0	0.14	10.18	105.38		
30.5	0.15	11.09	101.70		
30.0	0.23	12.00	97.65		
29.5	0.54	18.18	100.73		
29.0	0.74	17.72	99.71		
28.5	0.86	15.81	101.18		
28.0	1.94	25.52	100.91		
Pluma Térmica	4.95	25.53	97.09	2.14	0.74

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
32.0	31.68	33.83	2.15	32.48	0.49
31.5	30.87	31.89	1.03	31.52	0.23
31.0	30.48	31.55	1.07	31.11	0.24
30.5	30.00	31.03	1.03	30.62	0.23
30.0	29.62	30.59	0.97	30.16	0.20
29.5	29.08	30.10	1.03	29.68	0.17
29.0	28.43	29.59	1.16	29.20	0.20
28.5	28.34	29.02	0.67	28.71	0.15
28.0	27.87	28.52	0.65	28.18	0.13
Pluma Térmica	27.87	33.86	5.99	29.04	1.02

Figura 32. Características de la Pluma Térmica obtenida el 15 de julio de 2015.

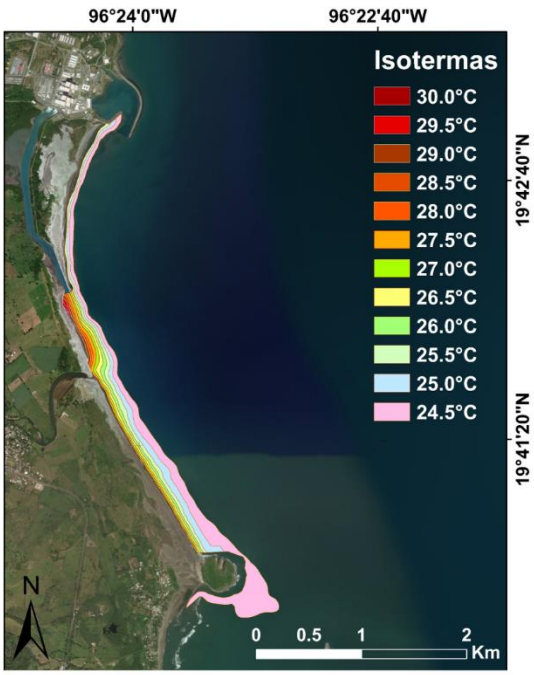


Pluma Térmica 17 de septiembre de 2015

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31.0	0.03	1.18	116.59		
30.5	0.13	3.40	141.33		
30.0	0.15	5.38	131.95		
29.5	0.27	7.27	116.97		
29.0	0.60	12.52	99.15		
28.5	1.15	16.93	106.91		
28.0	2.02	20.04	104.62		
27.5	2.82	28.34	119.84		
27.0	5.95	45.49	98.34		
Pluma Térmica	13.47	44.77	93.47	3.80	1.13

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.0	31.03	31.25	0.22	31.16	0.06
30.5	30.49	31.08	0.59	30.76	0.14
30.0	29.92	30.63	0.71	30.29	0.16
29.5	29.39	30.13	0.74	29.71	0.15
29.0	28.83	30.58	1.75	29.34	0.30
28.5	28.41	29.30	0.89	28.70	0.16
28.0	27.96	28.82	0.86	28.24	0.15
27.5	27.40	28.26	0.86	27.73	0.15
27.0	26.86	28.26	1.40	27.18	0.16
Pluma Térmica	26.86	31.25	4.40	27.85	0.84

Figura 33. Características de la Pluma Térmica obtenida el 17 de septiembre del 2015.



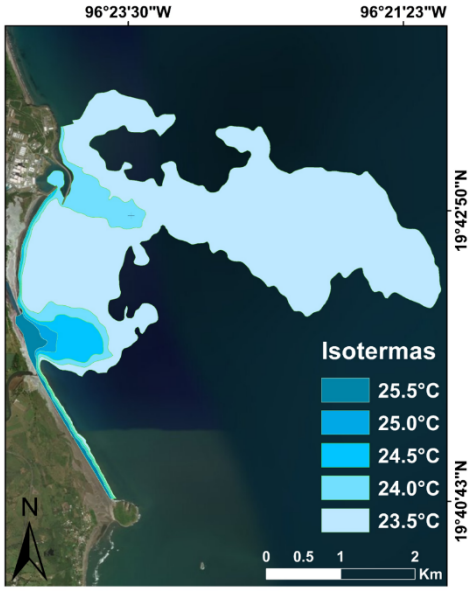
Pluma Térmica 06 de diciembre de 2015

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
30.0	0.00	0.30	119.31		
29.5	0.00	0.53	112.45		
29.0	0.01	1.83	109.97		
28.5	0.01	1.94	109.28		
28.0	0.01	2.00	109.34		
27.5	0.04	7.41	114.47		
27.0	0.04	7.46	114.34		
26.5	0.05	7.46	114.32		
26.0	0.06	7.51	114.34		
25.5	0.10	11.74	105.28		
25.0	0.16	12.16	106.71		
24.5	0.41	16.04	111.61		
Pluma Térmica	1.09	17.21	110.65	1.45	0.24

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
30.0	30.19	30.37	0.18	30.26	0.08
29.5	29.86	30.06	0.19	29.98	0.08
29.0	29.43	29.88	0.45	29.63	0.14
28.5	28.84	29.28	0.45	29.10	0.13
28.0	28.32	28.94	0.62	28.64	0.18
27.5	27.87	28.57	0.70	28.17	0.16
27.0	27.30	27.98	0.68	27.63	0.18
26.5	26.76	27.36	0.60	27.07	0.16
26.0	26.22	26.91	0.69	26.55	0.17
25.5	25.64	26.47	0.83	26.02	0.20
25.0	25.03	25.96	0.93	25.41	0.20
24.5	24.46	25.32	0.86	24.79	0.18
Pluma Térmica	24.49	30.58	6.09	25.95	1.39

Figura 34. Características de la Pluma Térmica obtenida el 6 de diciembre de 2015.

En cuanto a las temperaturas máximas y mínimas de las isotermas que conforman las plumas térmicas, se pudo observar que la PT del 3 de octubre presenta una isoterma máxima de 34.0°C, una isoterma mínima de 30.0°C y una temperatura promedio de 30.8°C con una razón de dispersión de 1.17°C, siendo la pluma térmica de mayor intensidad térmica en este año. Por otra parte la PT del 31 de julio (Figura 35) presenta el rango de isotermas mínimo en este año, oscilando entre 25.5°C y 23.5°C.



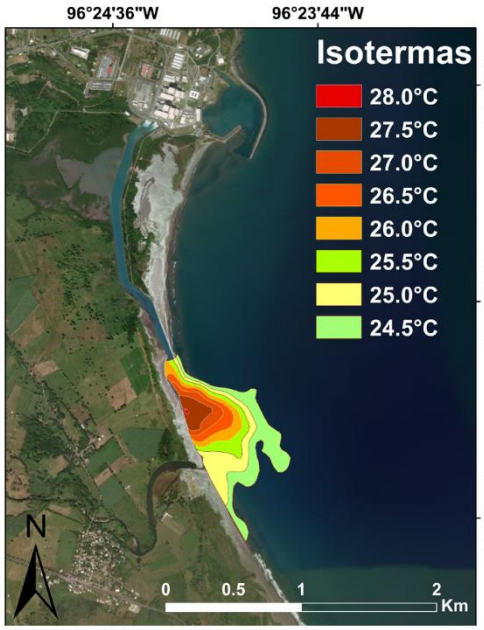
Pluma Térmica 31 de julio de 2015					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
25.5	0.19	7.88	115.08		
25.0	0.12	9.24	103.75		
24.5	0.43	12.81	106.21		
24.0	0.85	22.49	85.28		
23.5	8.27	45.42	179.20		
Pluma Térmica	10.08	43.26	5.71	2.47	1.30

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
25.5	24.92	29.44	4.53	26.29	0.82
25.0	24.46	25.48	1.02	25.03	0.25
24.5	24.11	25.55	1.44	24.82	0.30
24.0	23.62	24.58	0.96	24.16	0.15
23.5	22.96	24.63	1.67	23.81	0.29
Pluma Térmica	22.96	29.44	6.48	23.99	0.60

Figura 35. Características de la Pluma Térmica obtenida el 31 de julio del 2015.

Año 2016

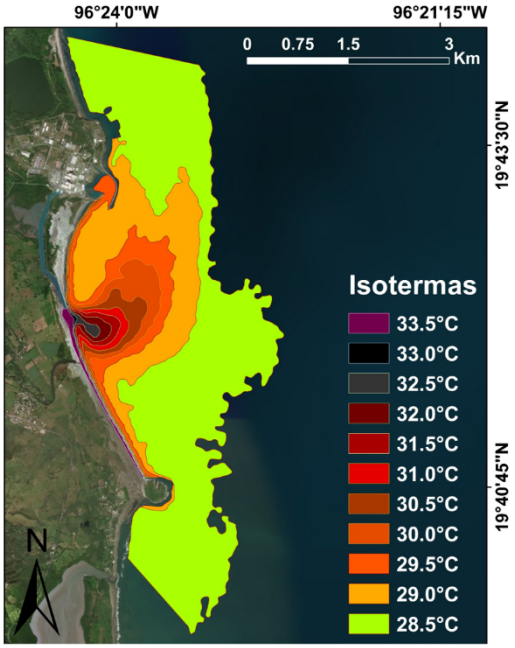
El año 2016 fue el año con mayor cantidad de imágenes obtenidas y procesadas con un total de 17 imágenes provenientes del satélite Landsat-8. Estas imágenes corresponden a los meses de enero, marzo, abri, mayo, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre. Es por esto, que en este año existió una presencia significativa en cuanto a las imágenes dispobibles para cada uno de los períodos de estudio, nueve imágenes en el período de secas y ocho imágenes en el período de lluvias. Las dimensiones espaciales de las plumas térmicas en este año se encuentran en los rangos de 0.46 km² a 15.63 km² para el área y 5.57 km a 41.18 km para el perímetro, perteneciendo los límites inferiores y superiores de cada rango a las plumas térmicas del 21 de octubre (Figura 36) y 30 de mayo (Figura 37) respectivamente.



Pluma Térmica 21 de octubre de 2016					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
28.0	0.001	0.22	134.9		
27.5	0.036	1.22	113.3		
27.0	0.034	2.08	126.3		
26.5	0.041	2.58	129.2		
26.0	0.046	3.13	128.5		
25.5	0.05	3.43	119.65		
25.0	0.10	4.43	93.48		
24.5	0.15	5.94	95.95		
Pluma Térmica	0.46	5.57	118.71	0.51	0.29

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
28.0	28.05	28.05	SD	28.05	SD
27.5	27.37	28.05	0.67	27.77	0.15
27.0	26.94	27.61	0.68	27.33	0.17
26.5	26.23	27.24	1.01	26.84	0.21
26.0	26.03	26.74	0.71	26.37	0.20
25.5	25.37	26.36	0.99	25.83	0.24
25.0	24.83	26.91	2.08	25.52	0.42
24.5	24.43	25.52	1.09	24.74	0.21
Pluma Térmica	24.43	28.05	3.62	25.82	1.02

Figura 36. Características de la Pluma Térmica obtenida el 21 de octubre del 2016.



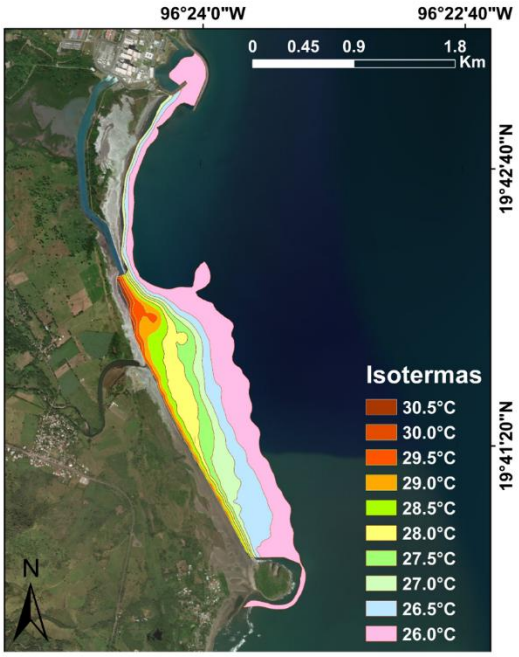
Pluma Térmica 30 de mayo de 2016					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
33.5	0.03	6.02	113.3		
33.0	0.07	7.47	108.7		
32.5	0.13	9.32	105.5		
32.0	0.14	9.82	102.6		
31.5	0.00	0.24	121.93		
31.0	0.20	14.55	102.15		
30.5	0.36	16.40	98.65		
30.0	0.62	18.51	88.18		
29.5	0.94	22.31	90.58		
29.0	2.93	26.57	90.65		
28.5	9.49	41.43	95.17		
Pluma Térmica	15.63	41.18	96.30	4.13	1.20

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
33.5	33.85	38.21	4.36	35.66	0.85
33.0	33.08	34.86	1.78	34.15	0.49
32.5	32.39	34.25	1.85	33.05	0.57
32.0	31.69	33.73	2.04	32.42	0.38
31.5	31.29	33.17	1.88	31.93	0.41
31.0	30.94	32.55	1.61	31.43	0.33
30.5	30.34	31.85	1.51	30.82	0.24
30.0	29.92	31.12	1.20	30.30	0.20
29.5	29.29	30.51	1.21	29.75	0.18
29.0	28.80	29.78	0.99	29.22	0.16
28.5	28.39	29.59	1.20	28.70	0.15
Pluma Térmica	28.39	37.12	8.73	29.18	0.95

Figura 37. Características de la Pluma Térmica obtenida el 30 de mayo del 2016.

Por otro lado, la dirección de la dispersión de las plumas térmicas, siete de orientan hacia sureste (7 de enero (Figura 38), 23 de enero (Figura 39), 28 de abril, 14 de mayo (Figura 40), 17 de julio (Figura 41), 6 de noviembre (Figura 42) y 8 de diciembre (Figura 43)), siete hacia el este (12 de abril, 1 de julio (Figura 44), 18 de agosto (Figura 45), 5 de octubre (Figura 46),

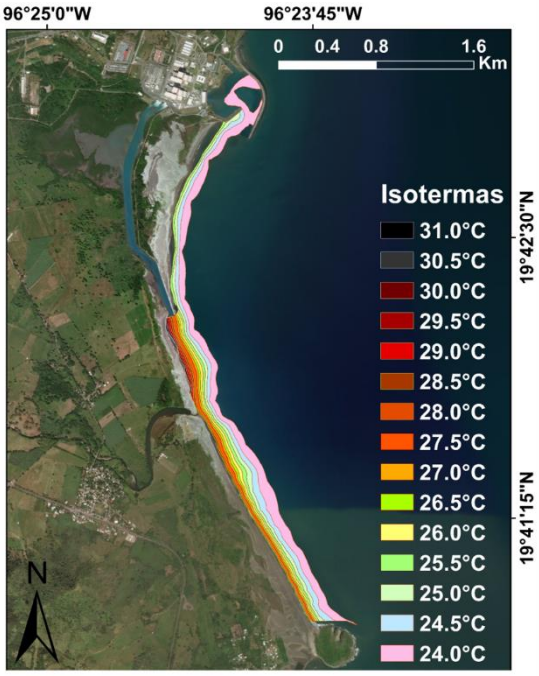
21 de octubre, 22 de noviembre (Figura 47) y 24 de diciembre (Figura 48)) y tres hacia el noreste (27 de marzo (Figura 49), 30 de mayo y 19 de septiembre (Figura 50)).



Pluma Térmica 07 de enero de 2016					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31.0	0.00	0.66	116.95		
30.5	0.01	1.33	106.76		
30.0	0.02	1.85	104.34		
29.5	0.06	6.94	111.49		
29.0	0.08	7.81	111.33		
28.5	0.10	7.71	110.90		
28.0	0.20	7.83	108.34		
27.5	0.16	7.82	107.20		
27.0	0.22	11.88	106.45		
26.5	0.35	12.28	108.28		
26.0	0.79	17.27	104.30		
Pluma Térmica	2.19	18.86	104.33	0.39	0.10

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.0	31.19	31.46	0.26	31.29	0.10
30.5	30.69	31.34	0.66	30.91	0.20
30.0	30.15	30.85	0.70	30.48	0.18
29.5	29.50	30.25	0.75	29.84	0.20
29.0	29.03	29.82	0.78	29.38	0.18
28.5	28.53	29.21	0.68	28.83	0.18
28.0	27.99	28.72	0.73	28.30	0.16
27.5	27.44	28.30	0.86	27.82	0.16
27.0	26.94	27.99	1.05	27.34	0.20
26.5	26.47	27.40	0.93	26.81	0.18
26.0	25.87	26.80	0.93	26.24	0.17
Pluma Térmica	25.87	31.46	5.58	27.29	1.16

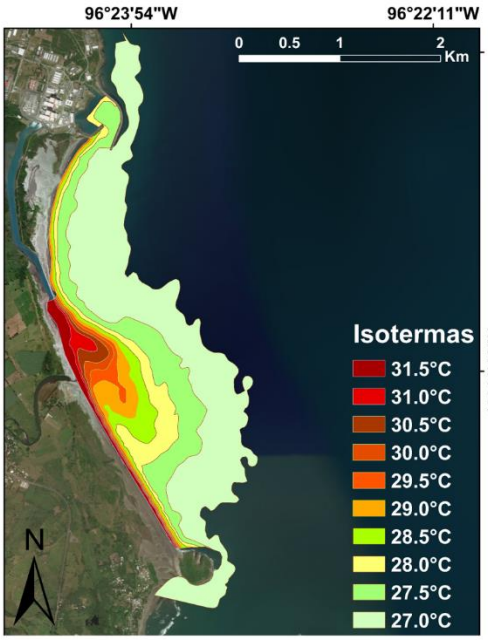
Figura 38. Características de la Pluma Térmica obtenida el 7 de enero del 2016.



Pluma Térmica 23 de enero de 2016					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31.0	0.0001	0.04	90.0		
30.5	0.002	0.49	115.64		
30.0	0.01	1.66	110.18		
29.5	0.01	1.77	109.28		
29.0	0.01	1.81	108.50		
28.5	0.03	7.21	115.03		
28.0	0.03	7.34	114.91		
27.5	0.03	7.34	114.78		
27.0	0.03	7.35	114.67		
26.5	0.04	7.38	114.63		
26.0	0.04	7.44	114.53		
25.5	0.07	11.62	104.64		
25.0	0.10	12.05	103.50		
24.5	0.15	12.28	104.05		
24.0	0.31	14.52	99.97		
Pluma Térmica	1.02	16.02	100.04	0.25	0.10

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.0	SD	SD	SD	SD	SD
30.5	31.03	31.30	0.27	31.19	0.11
30.0	30.59	31.00	0.41	30.81	0.14
29.5	30.17	30.49	0.32	30.35	0.11
29.0	29.50	30.08	0.58	29.78	0.14
28.5	29.04	29.91	0.87	29.37	0.21
28.0	28.44	29.08	0.64	28.78	0.19
27.5	28.02	28.63	0.61	28.28	0.15
27.0	27.47	28.09	0.62	27.72	0.14
26.5	26.87	27.53	0.66	27.17	0.17
26.0	26.27	27.01	0.75	26.62	0.19
25.5	25.70	26.51	0.81	26.11	0.19
25.0	25.13	25.92	0.79	25.47	0.18
24.5	24.59	25.36	0.77	24.91	0.19
24.0	23.99	24.74	0.74	24.30	0.17
Pluma Térmica	23.99	31.55	7.56	25.92	1.79

Figura 39. Características de la Pluma Térmica obtenida el 23 de enero del 2016.

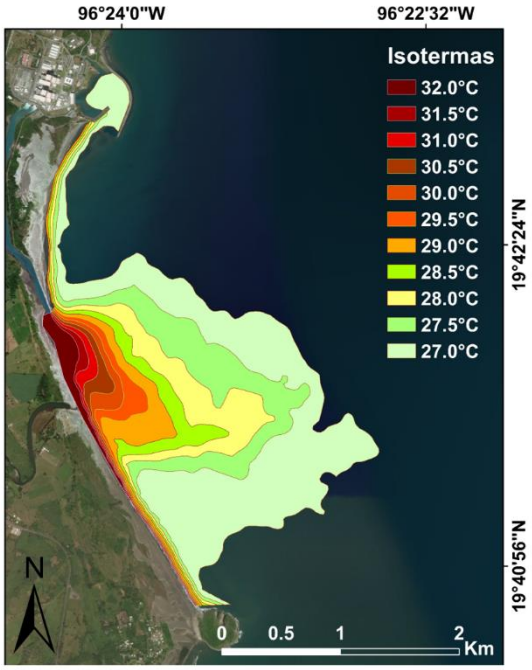


Pluma Térmica 14 de mayo de 2016

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31.5	0.12	7.46	114.0		
31.0	0.07	7.81	111.3		
30.5	0.08	8.36	109.7		
30.0	0.07	8.46	108.9		
29.5	0.12	13.25	104.20		
29.0	0.21	13.90	104.77		
28.5	0.25	14.28	106.00		
28.0	0.82	15.70	105.85		
27.5	0.40	15.99	103.18		
27.0	2.49	22.53	104.40		
Pluma Térmica	4.84	24.38	103.36	2.33	0.66

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.5	31.67	35.52	3.85	33.14	0.91
31.0	31.01	31.97	0.95	31.38	0.26
30.5	30.52	31.55	1.03	30.91	0.22
30.0	30.05	31.05	1.00	30.44	0.24
29.5	29.49	30.72	1.22	29.92	0.29
29.0	28.99	30.10	1.11	29.36	0.22
28.5	28.45	29.51	1.06	28.84	0.20
28.0	27.43	28.16	0.73	27.73	0.16
27.5	27.98	28.83	0.85	28.30	0.17
27.0	26.99	33.55	6.56	27.29	0.46
Pluma Térmica	26.99	35.52	8.53	28.08	1.36

Figura 40. Características de la Pluma Térmica obtenida el 14 de mayo del 2016.

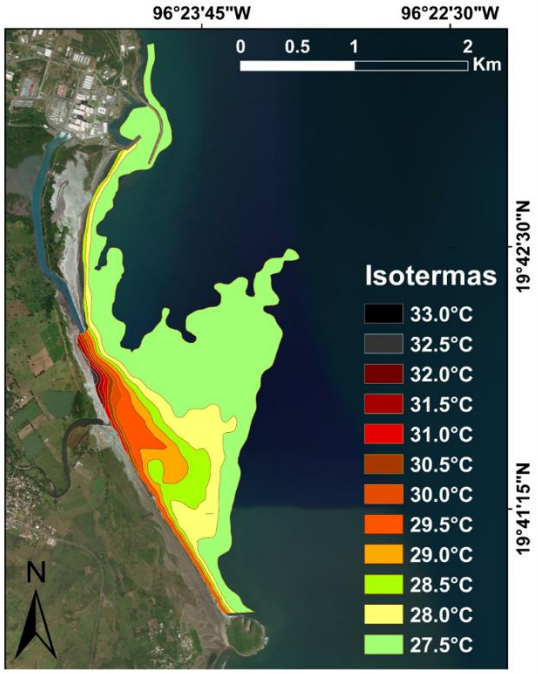


Pluma Térmica 17 de julio de 2016

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
32.0	0.118	4.59	109.0		
31.5	0.049	6.85	110.4		
31.0	0.065	7.36	109.4		
30.5	0.086	7.72	108.1		
30.0	0.098	8.06	106.9		
29.5	0.135	8.62	105.7		
29.0	0.268	13.48	107.2		
28.5	0.56	16.54	122.85		
28.0	0.29	14.60	112.46		
27.5	0.79	18.98	121.79		
27.0	2.04	22.27	112.02		
Pluma Térmica	4.60	19.75	118.68	1.63	0.90

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
32.0	32.11	36.57	4.46	33.72	1.08
31.5	31.55	32.64	1.09	32.01	0.29
31.0	31.04	32.17	1.13	31.48	0.29
30.5	30.57	31.61	1.05	30.89	0.25
30.0	30.04	31.24	1.19	30.39	0.26
29.5	29.48	30.53	1.05	29.83	0.22
29.0	28.97	30.09	1.12	29.35	0.24
28.5	27.96	28.92	0.96	28.29	0.17
28.0	28.49	29.44	0.95	28.81	0.21
27.5	27.47	28.39	0.92	27.75	0.16
27.0	26.55	27.70	1.15	27.21	0.16
Pluma Térmica	26.55	36.18	9.63	28.21	1.47

Figura 41. Características de la Pluma Térmica obtenida el 17 de julio del 2016.

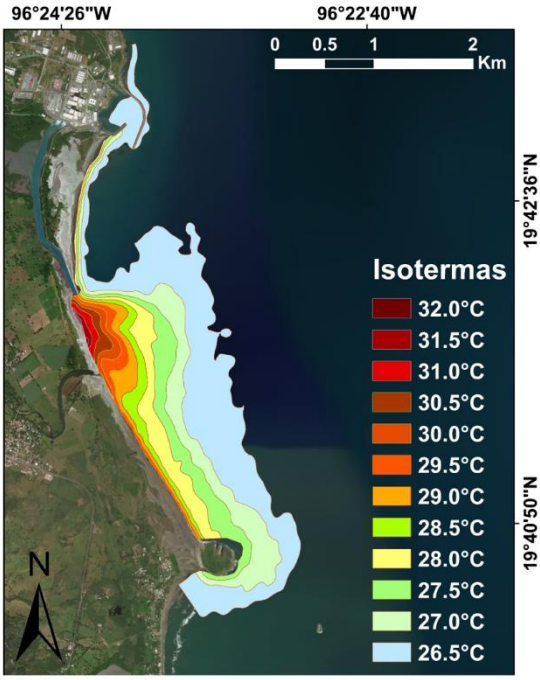


Pluma Térmica 06 de noviembre de 2016

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
33.0	0.000	0.08	105.1		
32.5	0.004	0.41	105.8		
32.0	0.012	1.64	109.2		
31.5	0.018	1.92	111.3		
31.0	0.028	3.11	107.8		
30.5	0.033	3.54	107.7		
30.0	0.065	7.51	112.9		
29.5	0.141	7.97	112.0		
29.0	0.175	9.15	111.8		
28.5	0.30	13.53	108.25		
28.0	0.45	13.86	108.28		
27.5	1.85	23.96	103.23		
Pluma Térmica	3.25	24.32	99.08	1.60	0.65

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
33.0	33.08	33.10	0.01	33.09	0.01
32.5	32.72	33.02	0.30	32.89	0.11
32.0	32.15	32.69	0.54	32.32	0.14
31.5	31.73	32.28	0.55	31.98	0.16
31.0	31.25	31.76	0.51	31.51	0.17
30.5	30.67	31.36	0.70	31.02	0.17
30.0	30.08	31.10	1.02	30.52	0.23
29.5	29.51	30.55	1.03	29.83	0.24
29.0	28.96	29.96	1.00	29.34	0.20
28.5	28.50	29.37	0.87	28.83	0.19
28.0	28.00	28.78	0.77	28.28	0.18
27.5	27.36	28.16	0.80	27.68	0.15
Pluma Térmica	27.36	33.08	5.72	28.31	0.99

Figura 42. Características de la Pluma Térmica obtenida el 6 de noviembre del 2016.

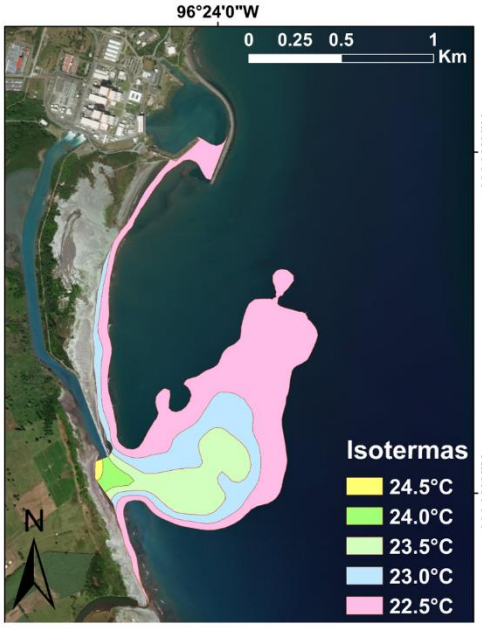


Pluma Térmica 08 de diciembre de 2016

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
32.0	0.001	0.20	99.46		
31.5	0.02	1.29	110.30		
31.0	0.04	1.88	108.50		
30.5	0.06	2.31	110.84		
30.0	0.07	3.69	101.97		
29.5	0.12	8.42	108.14		
29.0	0.17	8.47	105.81		
28.5	0.19	8.38	104.51		
28.0	0.41	12.28	106.53		
27.5	0.51	14.79	109.06		
27.0	0.72	16.65	110.26		
26.5	2.02	26.75	104.42		
Pluma Térmica	4.49	26.70	106.28	2.33	0.61

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
32.0	32.18	32.18	SD	32.18	SD
31.5	31.58	32.12	0.54	31.78	0.14
31.0	31.07	31.58	0.51	31.29	0.14
30.5	30.51	31.20	0.69	30.83	0.16
30.0	30.00	30.71	0.71	30.34	0.17
29.5	29.52	30.25	0.73	29.84	0.18
29.0	28.94	29.72	0.78	29.33	0.16
28.5	28.44	29.19	0.76	28.80	0.16
28.0	28.00	29.08	1.07	28.28	0.18
27.5	27.46	28.41	0.95	27.80	0.16
27.0	26.94	28.08	1.15	27.26	0.17
26.5	26.36	28.23	1.87	26.72	0.18
Pluma Térmica	26.36	32.18	5.82	27.57	1.12

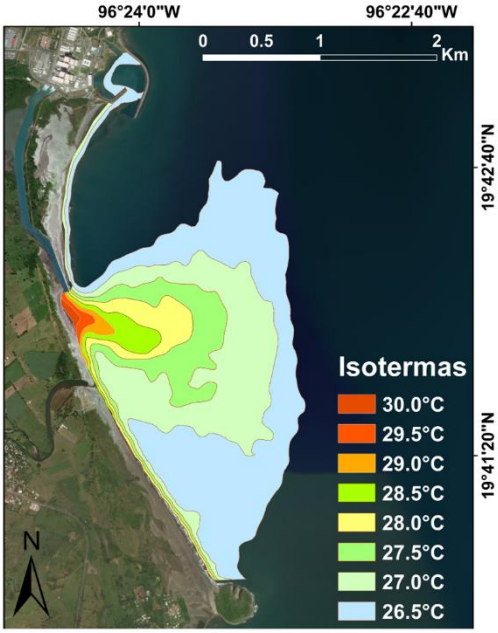
Figura 43. Características de la Pluma Térmica obtenida el 8 de diciembre del 2016.



Pluma Térmica 01 de julio de 2016					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
24.5	0.004	0.33	82.0		
24.0	0.02	0.81	144.15		
23.5	0.16	3.39	14.44		
23.0	0.21	8.54	130.58		
22.5	0.52	15.04	85.35		
Pluma Térmica	0.94	12.67	80.69	0.66	0.45

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
24.5	24.65	24.85	0.21	24.73	0.08
24.0	24.10	24.61	0.51	24.28	0.13
23.5	23.46	24.07	0.61	23.73	0.15
23.0	22.93	23.77	0.84	23.27	0.18
22.5	22.43	23.25	0.82	22.71	0.16
Pluma Térmica	22.47	24.85	2.38	23.07	0.48

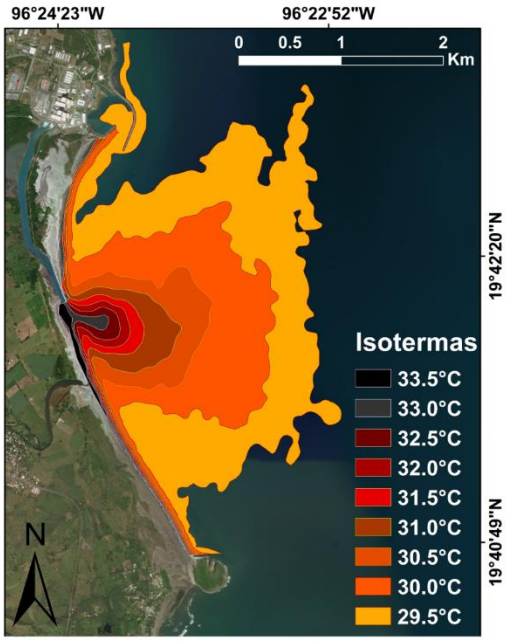
Figura 44. Características de la Pluma Térmica obtenida el 1 de julio del 2016.



Pluma Térmica 18 de agosto de 2016					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
30.0	0.016	0.99	119.4		
29.5	0.028	1.58	115.5		
29.0	0.045	2.59	108.8		
28.5	0.138	5.26	155.5		
28.0	0.280	11.36	94.8		
27.5	0.54	14.43	90.65		
27.0	1.31	21.39	100.93		
26.5	2.03	23.27	92.59		
Pluma Térmica	4.50	19.44	97.48	1.63	0.88

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
30.0	30.12	30.55	0.43	30.29	0.13
29.5	29.56	30.09	0.52	29.85	0.16
29.0	28.95	29.69	0.74	29.34	0.17
28.5	28.48	29.38	0.90	28.78	0.18
28.0	27.95	28.87	0.92	28.27	0.19
27.5	27.48	28.36	0.89	27.73	0.18
27.0	26.95	27.88	0.93	27.26	0.16
26.5	26.45	27.28	0.83	26.79	0.14
Pluma Térmica	26.47	30.71	4.24	27.28	0.67

Figura 45. Características de la Pluma Térmica obtenida el 18 de agosto del 2016.

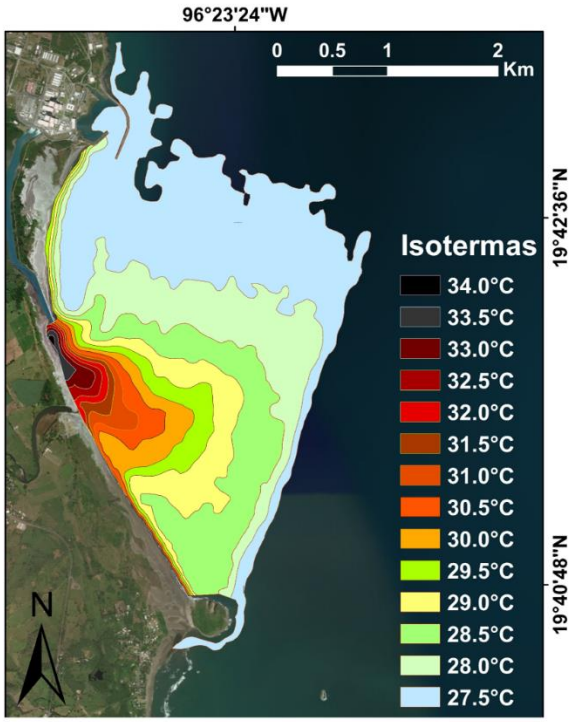


Pluma Térmica 05 de octubre de 2016

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
33.5	0.048	3.15	108.6		
33.0	0.064	7.90	108.8		
32.5	0.106	9.15	106.3		
32.0	0.118	9.72	104.7		
31.5	0.178	14.05	102.9		
31.0	0.387	15.10	104.3		
30.5	0.66	17.13	100.51		
30.0	1.98	21.64	108.40		
29.5	3.61	35.36	92.37		
Pluma Térmica	7.34	30.75	93.02	1.87	1.25

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
33.5	33.79	35.63	1.84	34.63	0.54
33.0	32.98	34.20	1.22	33.38	0.30
32.5	32.41	33.60	1.18	32.88	0.24
32.0	31.97	32.93	0.96	32.33	0.20
31.5	31.45	32.67	1.22	31.87	0.26
31.0	30.94	32.04	1.10	31.30	0.19
30.5	30.46	31.38	0.91	30.77	0.17
30.0	29.97	30.79	0.82	30.20	0.14
29.5	29.47	30.18	0.71	29.72	0.15
Pluma Térmica	29.47	35.63	6.17	30.28	0.90

Figura 46. Características de la Pluma Térmica obtenida el 5 de octubre del 2016.

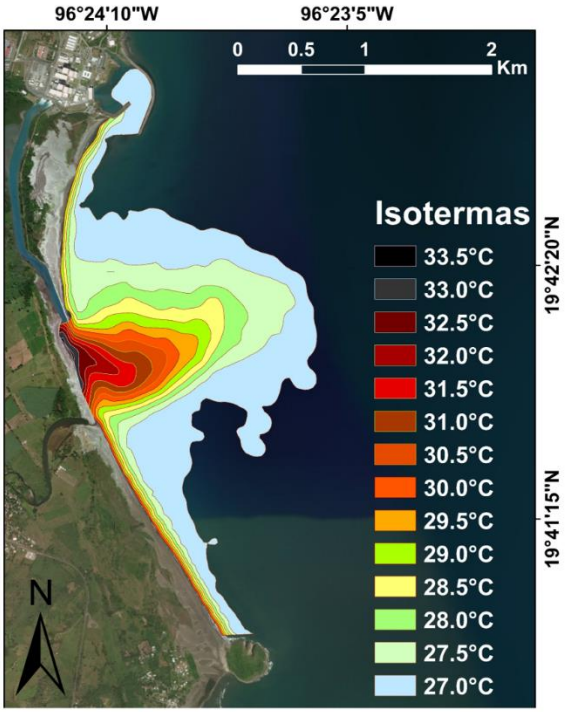


Pluma Térmica 22 de noviembre de 2016

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
34.0	0.003	0.29	107.6		
33.5	0.03	1.50	111.1		
33.0	0.05	2.33	120.5		
32.5	0.05	3.05	117.3		
32.0	0.05	3.64	107.1		
31.5	0.07	3.95	104.3		
31.0	0.12	5.78	106.7		
30.5	0.21	9.90	105.4		
30.0	0.33	10.30	103.7		
29.5	0.40	14.35	115.1		
29.0	0.73	16.30	109.3		
28.5	1.35	17.68	104.02		
28.0	1.45	20.18	133.45		
27.5	3.28	31.27	119.90		
Pluma Térmica	8.32	28.22	96.84	2.13	1.25

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
34.0	34.16	34.26	0.10	34.19	0.05
33.5	33.41	34.17	0.76	33.81	0.17
33.0	32.95	33.76	0.81	33.30	0.20
32.5	32.49	33.31	0.82	32.87	0.21
32.0	31.95	32.94	0.99	32.38	0.23
31.5	31.46	32.41	0.95	31.86	0.23
31.0	30.89	31.96	1.07	31.34	0.23
30.5	30.44	31.67	1.22	30.83	0.24
30.0	29.86	31.03	1.17	30.30	0.21
29.5	29.43	30.48	1.05	29.80	0.20
29.0	28.89	29.93	1.04	29.25	0.18
28.5	28.37	29.30	0.93	28.77	0.16
28.0	27.95	28.74	0.79	28.26	0.16
27.5	27.41	28.18	0.78	27.71	0.15
Pluma Térmica	27.41	34.26	6.85	28.63	1.18

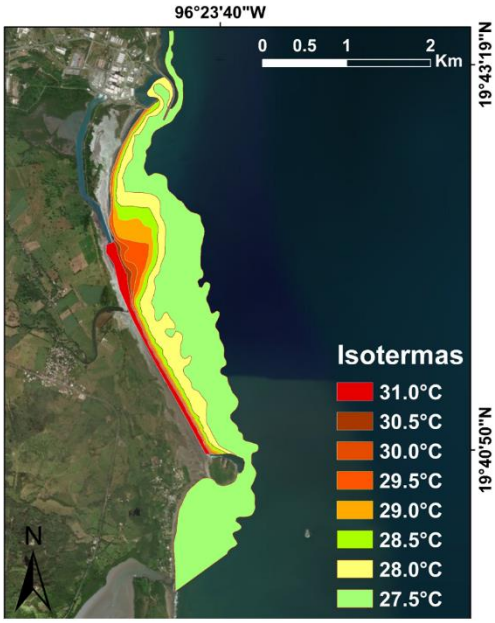
Figura 47. Características de la Pluma Térmica obtenida el 22 de noviembre del 2016.



Pluma Térmica 24 de diciembre de 2016					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
33.5	0.002	0.59	119.24		
33.0	0.01	1.28	108.58		
32.5	0.03	1.71	109.79		
32.0	0.04	2.41	126.53		
31.5	0.06	3.14	140.84		
31.0	0.08	3.72	160.83		
30.5	0.09	4.26	175.34		
30.0	0.11	9.95	98.75		
29.5	0.14	10.60	93.57		
29.0	0.18	14.91	102.22		
28.5	0.24	15.69	100.24		
28.0	0.34	16.53	101.03		
27.5	0.67	17.33	103.48		
27.0	1.63	21.04	100.29		
Pluma Térmica	3.74	19.49	99.97	1.46	0.82

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
33.5	33.59	33.76	0.17	33.68	0.07
33.0	33.16	33.69	0.53	33.41	0.13
32.5	32.55	33.27	0.72	32.83	0.20
32.0	32.07	32.83	0.76	32.37	0.20
31.5	31.51	32.26	0.75	31.82	0.18
31.0	30.97	31.87	0.90	31.30	0.17
30.5	30.49	31.07	0.58	30.80	0.14
30.0	30.01	31.10	1.08	30.42	0.24
29.5	29.50	30.58	1.08	29.86	0.24
29.0	28.98	30.07	1.09	29.39	0.25
28.5	28.46	29.51	1.05	28.85	0.23
28.0	27.95	28.95	1.01	28.31	0.20
27.5	27.49	28.33	0.84	27.76	0.17
27.0	26.89	27.80	0.91	27.22	0.15
Pluma Térmica	26.89	33.69	6.80	28.25	1.40

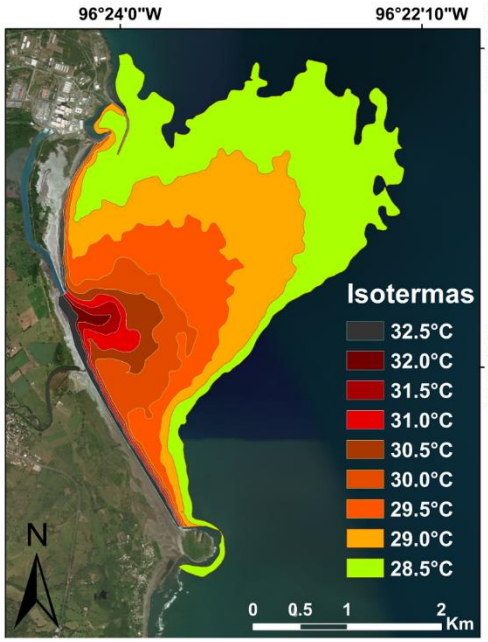
Figura 48. Características de la Pluma Térmica obtenida el 24 de diciembre del 2016.



Pluma Térmica 27 de marzo de 2016					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31.0	0.1675	7.54	114.9		
30.5	0.05	7.48	113.15		
30.0	0.16	12.23	104.59		
29.5	0.09	11.88	104.54		
29.0	0.20	12.84	104.43		
28.5	0.23	13.19	102.54		
28.0	0.62	16.19	100.17		
27.5	2.64	24.10	97.77		
Pluma Térmica	4.35	24.88	100.30	2.77	0.50

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.0	31.11	35.42	4.31	32.80	1.10
30.5	30.55	31.32	0.77	30.88	0.18
30.0	29.43	30.61	1.18	29.90	0.24
29.5	29.99	31.38	1.39	30.46	0.32
29.0	28.85	30.21	1.36	29.32	0.23
28.5	28.43	29.50	1.07	28.82	0.22
28.0	27.93	28.83	0.89	28.23	0.17
27.5	27.47	36.56	9.09	28.12	1.28
Pluma Térmica	27.47	36.56	9.09	28.62	1.50

Figura 49. Características de la Pluma Térmica obtenida el 27 de marzo del 2016.



Pluma Térmica 19 de septiembre de 2016

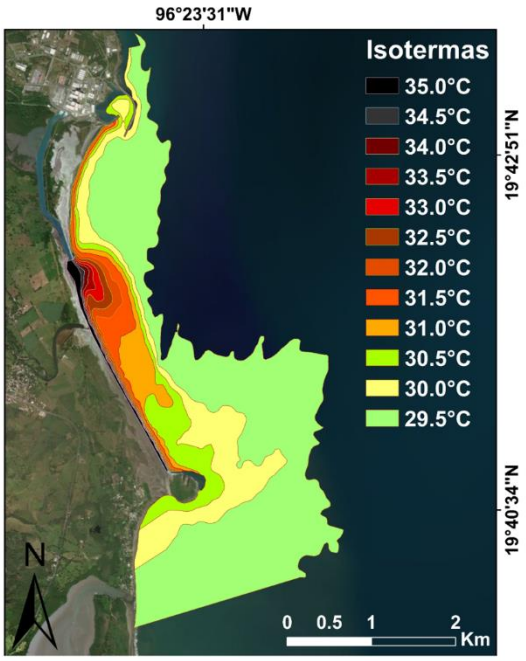
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
32.5	0.132	7.49	114.9		
32.0	0.073	7.46	109.7		
31.5	0.129	8.89	106.0		
31.0	0.192	9.54	105.1		
30.5	0.377	14.94	103.6		
30.0	0.822	16.79	98.8		
29.5	1.54	18.91	93.53		
29.0	2.31	23.50	94.73		
28.5	3.93	35.10	71.38		
Pluma Térmica	9.73	31.71	58.99	2.14	1.45

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
32.5	32.62	35.99	3.37	34.21	0.78
32.0	31.99	33.33	1.34	32.50	0.38
31.5	31.49	32.62	1.13	31.90	0.29
31.0	30.89	32.04	1.15	31.34	0.25
30.5	30.46	31.71	1.25	30.80	0.21
30.0	29.81	31.04	1.23	30.26	0.18
29.5	29.49	30.30	0.82	29.76	0.15
29.0	28.95	29.71	0.76	29.26	0.15
28.5	28.44	29.33	0.90	28.72	0.16
Pluma Térmica	28.44	35.99	7.55	29.46	1.00

Figura 50. Características de la Pluma Térmica obtenida el 19 de septiembre del 2016.

En el 2016 se pudo observar el proceso de recirculación hacia la obra de toma en 14 plumas térmicas (83% de las imágenes del 2016), principalmente en las plumas térmicas del 28 de abril, 30 de mayo, 19 de septiembre y 5 de octubre, debido a que las isotermas llegan a influir en la obra de toma con temperaturas de 30.5°C, 29.5°C, 29.0°C y 29.5°C respectivamente. Por otra parte las plumas térmicas del 7 y 23 de enero, 27 de marzo, 14 de mayo, 17 de julio, 18 de agosto, 6 y 22 de noviembre, 8 y 24 de diciembre, aunque presentan recirculación, las temperaturas que llegan a incidir en la obra de toma son menores que las temperaturas de las plumas térmicas anteriores, pues solo llegan a incidir con valores de 26.0°C, 24.0°C, 28.0°C, 28.0°C, 27.0°C, 26.5°C, 27.5°C, 27.5°C, 26.5°C y 27.0°C respectivamente.

En cuanto a las temperaturas máximas y mínimas de las isotermas que conforman las plumas térmicas, se pudo observar que la PT del 28 de abril presenta una isoterma máxima de 35.0°C (Figura 51), una isoterma mínima de 29.5°C y una temperatura promedio de 30.4°C con una razón de dispersión de 1.34°C, siendo la pluma térmica de mayor intensidad térmica en este año. Por otra parte la PT del 12 de abril presenta el rango de isotermas mínimo en este año, oscilando entre 24.0°C y 21.0°C (Figura 52).

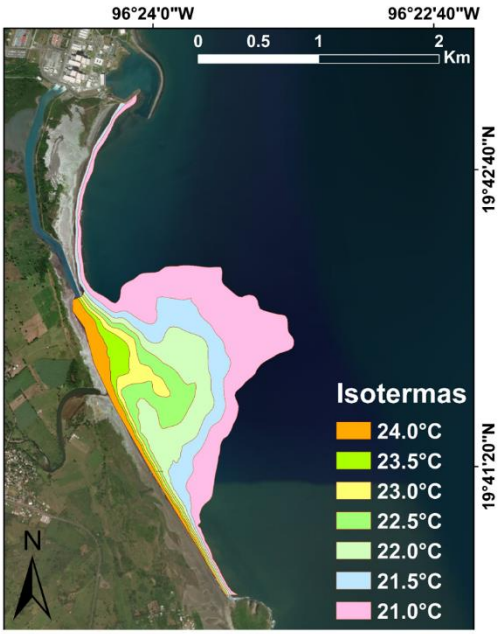


Pluma Térmica 28 de abril de 2016

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
35.0	0.0937	7.45	114.6		
34.5	0.0305	5.79	112.9		
34.0	0.0367	6.26	112.1		
33.5	0.0494	7.05	111.2		
33.0	0.0727	7.69	109.4		
32.5	0.1186	12.08	103.8		
32.0	0.15	12.71	103.86		
31.5	0.29	13.11	102.86		
31.0	0.44	14.06	106.34		
30.5	0.74	20.24	104.40		
30.0	1.40	24.45	106.24		
29.5	5.55	31.43	105.65		
Pluma Térmica	9.13	32.05	108.51	2.87	1.01

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
35.0	35.24	39.05	3.81	36.78	0.82
34.5	34.73	36.09	1.36	35.35	0.42
34.0	34.13	35.37	1.24	34.77	0.39
33.5	33.60	34.76	1.16	34.15	0.35
33.0	32.99	34.40	1.41	33.54	0.36
32.5	32.36	33.77	1.41	32.97	0.29
32.0	31.96	33.23	1.27	32.43	0.25
31.5	31.51	32.56	1.06	31.81	0.22
31.0	30.96	31.89	0.94	31.34	0.16
30.5	30.45	38.82	8.37	31.06	1.08
30.0	29.98	39.96	9.98	30.53	1.18
29.5	29.44	35.11	5.66	29.74	0.35
Pluma Térmica	29.44	39.96	10.52	30.40	1.34

Figura 51. Características de la Pluma Térmica obtenida el 28 de abril del 2016.



Pluma Térmica 12 de abril de 2016

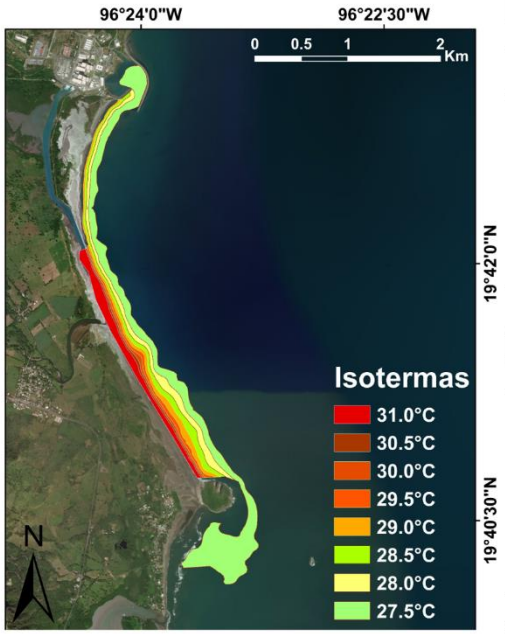
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
24.0	0.1268	6.52	114.9		
23.5	0.10	7.15	111.98		
23.0	0.12	8.68	110.50		
22.5	0.24	10.00	110.03		
22.0	0.40	10.10	95.29		
21.5	0.39	14.28	107.06		
21.0	0.84	15.59	109.37		
Pluma Térmica	2.27	14.61	105.40	1.13	0.64

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
24.0	23.76	26.08	2.32	24.55	0.57
23.5	23.12	23.96	0.84	23.63	0.19
23.0	22.65	23.47	0.82	23.11	0.17
22.5	22.21	22.99	0.78	22.67	0.16
22.0	21.83	22.52	0.69	22.22	0.16
21.5	21.16	22.05	0.89	21.68	0.17
21.0	20.76	21.56	0.80	21.20	0.16
Pluma Térmica	20.76	26.08	5.32	22.04	0.96

Figura 52. Características de la Pluma Térmica obtenida el 12 de abril del 2016.

Año 2017

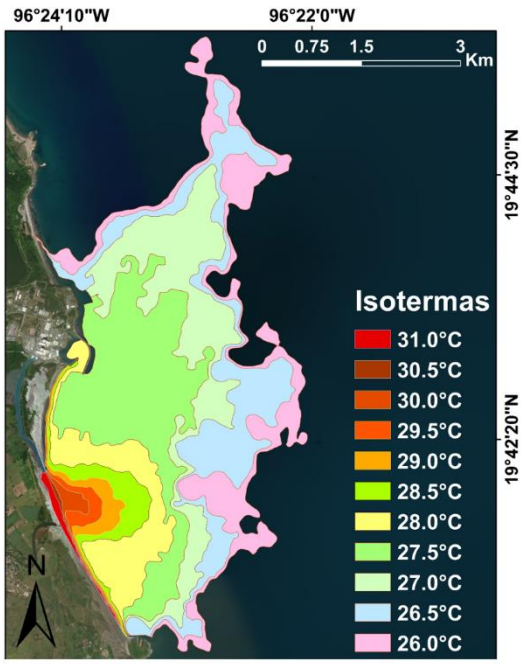
En el 2017 se pudieron obtener un total de nueve imágenes, las cuales pertenecen a los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio y octubre. En este año existen cinco imágenes en el período de lluvias y cuatro imágenes en el período de secas. En cuanto a las dimensiones espaciales de las plumas térmicas el área y el perímetro se encuentran en los rangos de 2.04 km² a 19.43 km² y 20.02 km a 56.06 km respectivamente, siendo la PT del 1 de mayo la que presenta menor área y perímetro (Figura 53), mientras que las plumas térmicas del 4 de julio (Figura 54) y 18 de junio (Figura 55) las de máyor área y perímetro respectivamente.



Pluma Térmica 01 de mayo de 2017					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31.0	0.17	7.49	115.38		
30.5	0.04	7.40	115.19		
30.0	0.05	7.44	115.27		
29.5	0.07	7.66	115.70		
29.0	0.12	11.88	107.71		
28.5	0.16	12.29	107.08		
28.0	0.21	12.67	106.86		
27.5	0.78	18.49	103.66		
Pluma Térmica	2.04	20.02	104.19	1.99	0.33

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.0	31.58	35.47	3.89	32.95	0.90
30.5	30.89	31.69	0.80	31.33	0.19
30.0	30.30	31.16	0.85	30.76	0.20
29.5	29.73	30.70	0.97	30.15	0.22
29.0	28.95	30.06	1.11	29.51	0.22
28.5	28.56	29.51	0.95	28.97	0.19
28.0	27.99	28.83	0.84	28.41	0.18
27.5	27.36	28.21	0.85	27.77	0.17
Pluma Térmica	27.36	36.45	9.09	28.97	1.60

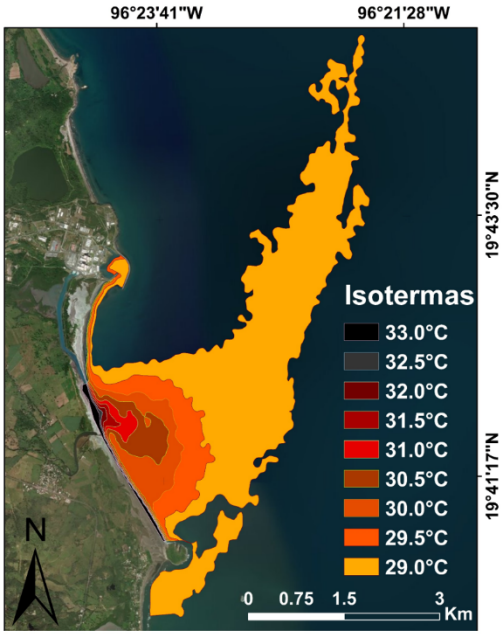
Figura 53. Características de la Pluma Térmica obtenida el 1 de mayo del 2017.



Pluma Térmica 04 de julio de 2017					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31.0	0.12	6.26	113.70		
30.5	0.05	6.22	112.43		
30.0	0.17	7.58	108.48		
29.5	0.28	12.35	105.40		
29.0	0.41	13.71	107.69		
28.5	0.74	15.72	111.83		
28.0	2.03	18.60	104.34		
27.5	4.89	28.52	93.26		
27.0	3.82	38.02	91.31		
26.5	3.59	50.63	88.95		
26.0	3.03	62.43	90.62		
Pluma Térmica	19.43	46.50	81.63	3.74	1.66

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.0	31.10	34.79	3.69	32.54	0.97
30.5	30.55	31.24	0.69	30.88	0.18
30.0	29.97	31.02	1.05	30.27	0.18
29.5	29.43	30.52	1.09	29.80	0.21
29.0	28.94	30.14	1.20	29.27	0.20
28.5	28.47	29.48	1.02	28.74	0.17
28.0	27.52	28.89	1.37	28.24	0.16
27.5	27.22	28.26	1.04	27.69	0.13
27.0	26.38	27.89	1.51	27.27	0.17
26.5	22.55	27.38	4.83	26.52	0.71
26.0	21.71	26.85	5.13	26.06	0.59
Pluma Térmica	21.71	34.79	13.07	27.38	1.13

Figura 54. Características de la Pluma Térmica obtenida el 4 de julio del 2017.



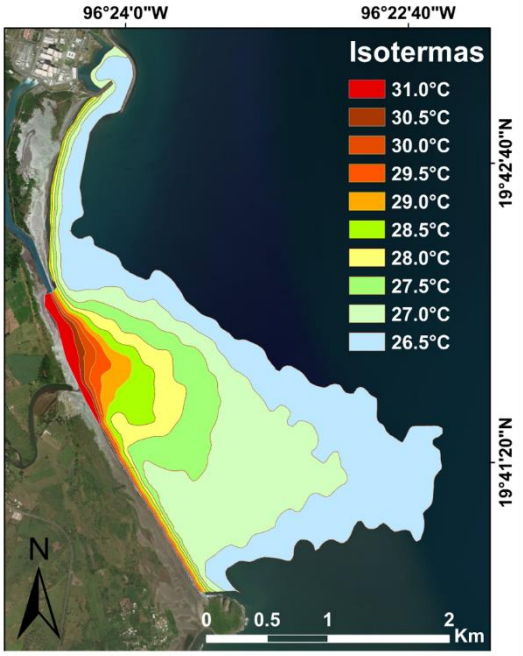
Pluma Térmica 18 de junio de 2017					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
33.0	0.11	7.15	115.46		
32.5	0.03	5.41	114.44		
32.0	0.05	5.70	113.22		
31.5	0.07	6.63	111.71		
31.0	0.18	8.74	109.06		
30.5	0.55	15.81	113.56		
30.0	0.88	16.37	105.13		
29.5	1.23	17.44	109.34		
29.0	8.35	56.37	67.58		
Pluma Térmica	11.76	56.06	62.11	3.12	1.20

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
33.0	33.23	37.20	3.97	34.76	0.89
32.5	32.71	33.73	1.02	33.29	0.30
32.0	32.09	33.24	1.15	32.64	0.34
31.5	31.49	32.88	1.40	32.00	0.36
31.0	30.93	32.19	1.27	31.32	0.26
30.5	30.40	31.58	1.18	30.76	0.20
30.0	29.64	30.98	1.34	30.23	0.20
29.5	29.44	30.29	0.85	29.73	0.16
29.0	28.79	29.70	0.90	29.16	0.13
Pluma Térmica	28.79	37.16	8.37	29.56	0.91

Figura 55. Características de la Pluma Térmica obtenida el 18 de junio del 2017.

Respecto a la dirección de la dispersión de las plumas térmicas, cinco se orientan hacia el sureste (26 de febrero (Figura 56), 30 de marzo (Figura 57), 15 de abril (Figura 58), 1 de mayo y 8 de octubre (Figura 59)), tres hacia el noreste (25 de enero (Figura 60), 18 de junio y 4 de julio) y una hacia el norte (17 de mayo). El proceso de recirculación hacia la obra de

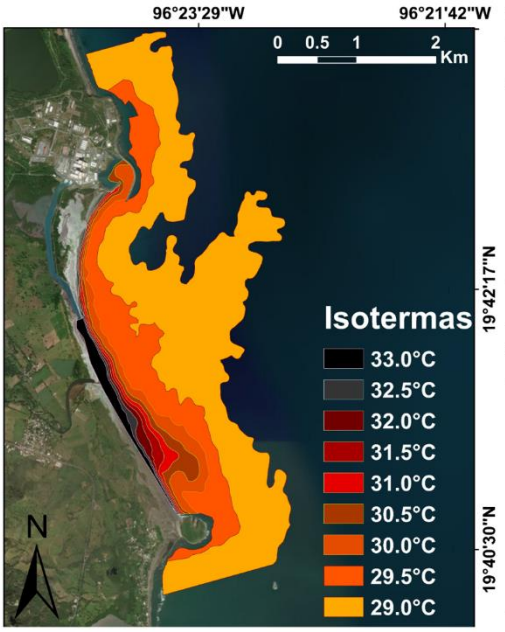
toma en el 2017 estuvo presente en ocho plumas térmicas (89% del total de imágenes), principalmente en las plumas térmicas del 25 de enero, 30 de marzo, 17 de mayo y 18 de junio, con unas temperaturas máximas en las isotermas que inciden en el área de la obra de toma de 29.0°C, 30.5°C, 31.0°C y 29.5°C respectivamente; mientras que las plumas térmicas del 26 de febrero, 1 de mayo, 4 de julio y 8 de octubre inciden con una intensidad menor de 27.0°C, 27.5°C, 28.0°C y 27.0°C respectivamente.



Pluma Térmica 26 de febrero de 2017					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31.0	0.08	3.04	109.04		
30.5	0.05	6.83	112.89		
30.0	0.06	7.20	111.45		
29.5	0.08	7.51	110.03		
29.0	0.12	8.03	107.65		
28.5	0.33	13.48	107.52		
28.0	0.23	12.78	105.44		
27.5	0.58	14.34	108.98		
27.0	2.04	21.69	129.50		
26.5	1.56	18.75	114.00		
Pluma Térmica	5.22	20.19	128.24	1.87	0.89

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.0	31.17	33.36	2.18	32.07	0.60
30.5	30.53	31.29	0.77	30.90	0.19
30.0	30.08	30.92	0.84	30.40	0.20
29.5	29.47	30.25	0.78	29.84	0.17
29.0	28.92	29.77	0.85	29.31	0.17
28.5	27.88	29.12	1.23	28.32	0.21
28.0	28.46	29.67	1.21	28.82	0.23
27.5	27.44	28.42	0.97	27.77	0.16
27.0	26.47	27.34	0.88	26.74	0.15
26.5	26.95	27.88	0.93	27.24	0.15
Pluma Térmica	26.47	33.26	6.79	27.51	1.10

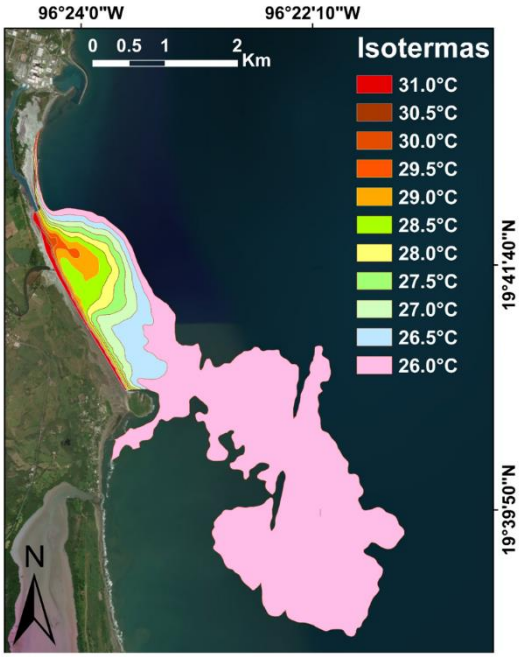
Figura 56. Características de la Pluma Térmica obtenida el 26 de febrero del 2017.



Pluma Térmica 30 de marzo de 2017					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
33.0	0.21	7.42	113.96		
32.5	0.07	7.40	113.27		
32.0	0.12	11.49	105.80		
31.5	0.14	11.84	107.03		
31.0	0.16	12.42	106.95		
30.5	0.54	15.04	104.99		
30.0	0.30	14.81	105.14		
29.5	1.94	22.88	100.81		
29.0	5.75	36.05	99.47		
Pluma Térmica	9.69	37.99	98.53	3.21	0.96

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
33.0	33.15	37.59	4.44	34.80	1.09
32.5	32.57	33.63	1.06	33.03	0.25
32.0	32.04	33.06	1.02	32.46	0.25
31.5	31.56	32.58	1.03	31.98	0.22
31.0	31.02	31.99	0.97	31.41	0.21
30.5	29.99	30.70	0.70	30.27	0.16
30.0	30.47	31.27	0.80	30.84	0.18
29.5	29.48	30.12	0.65	29.73	0.14
29.0	28.95	30.12	1.16	29.24	0.17
Pluma Térmica	28.95	37.55	8.59	29.81	1.13

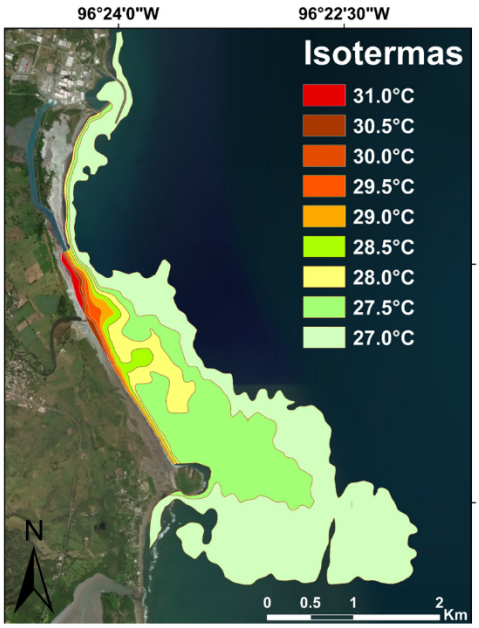
Figura 57. Características de la Pluma Térmica obtenida el 30 de marzo del 2017.



Pluma Térmica 15 de abril de 2017					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31.0	0.10	7.46	115.70		
30.5	0.03	5.03	115.12		
30.0	0.04	5.34	114.03		
29.5	0.08	7.14	111.44		
29.0	0.21	9.09	109.97		
28.5	0.31	9.29	107.31		
28.0	0.22	8.89	104.27		
27.5	0.26	10.61	109.10		
27.0	0.37	10.61	106.20		
26.5	0.60	11.88	111.80		
26.0	7.47	40.32	120.08		
Pluma Térmica	9.92	40.76	126.89	3.24	0.97

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.0	31.28	34.48	3.20	32.53	0.77
30.5	30.61	31.59	0.98	31.09	0.21
30.0	29.98	30.99	1.01	30.50	0.25
29.5	29.47	30.42	0.95	29.84	0.24
29.0	28.93	29.84	0.91	29.28	0.17
28.5	28.46	29.36	0.90	28.80	0.15
28.0	28.00	28.72	0.72	28.31	0.16
27.5	27.46	28.76	1.30	27.82	0.19
27.0	26.98	28.34	1.36	27.27	0.18
26.5	26.50	27.83	1.33	26.76	0.16
26.0	25.87	27.23	1.36	26.30	0.17
Pluma Térmica	25.93	34.48	8.55	26.74	1.06

Figura 58. Características de la Pluma Térmica obtenida el 15 de abril del 2017.

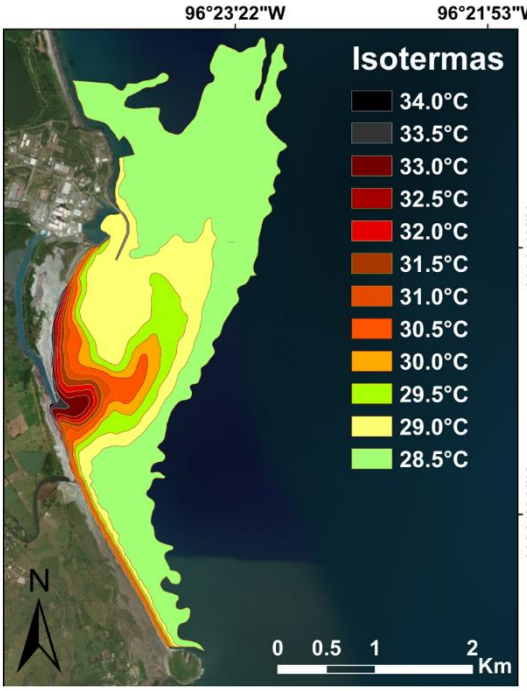


Pluma Térmica 08 de octubre de 2017

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31.0	0.04	1.80	109.14		
30.5	0.04	3.61	108.14		
30.0	0.05	6.80	113.90		
29.5	0.07	7.03	113.17		
29.0	0.09	7.54	111.57		
28.5	0.16	8.93	113.32		
28.0	0.47	15.92	113.44		
27.5	1.88	21.56	124.09		
27.0	4.04	38.70	118.84		
Pluma Térmica	7.09	36.88	121.43	2.62	0.86

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.0	31.10	32.64	1.54	31.73	0.39
30.5	30.54	32.32	1.78	31.12	0.43
30.0	30.06	30.90	0.83	30.41	0.18
29.5	29.53	30.36	0.82	29.86	0.20
29.0	29.01	29.86	0.85	29.37	0.17
28.5	28.43	29.17	0.74	28.74	0.18
28.0	27.93	29.09	1.16	28.24	0.19
27.5	27.39	28.46	1.07	27.72	0.14
27.0	26.92	28.26	1.34	27.23	0.15
Pluma Térmica	26.92	32.32	5.40	27.63	0.75

Figura 59. Características de la Pluma Térmica obtenida el 8 de octubre del 2017.



Pluma Térmica 25 de enero de 2017

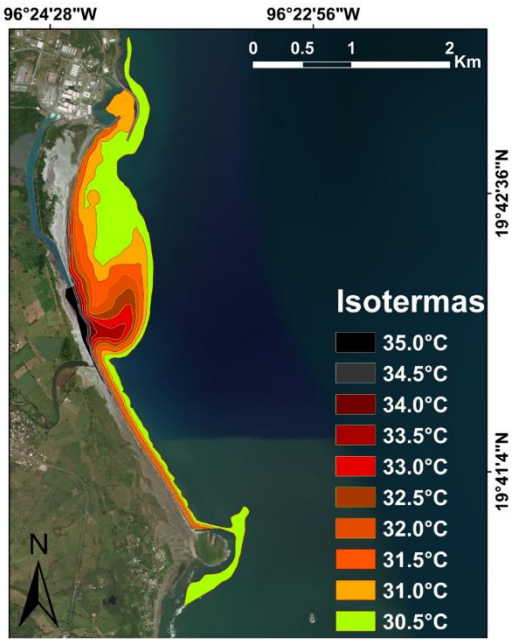
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
34.0	0.003	0.43	61.76		
33.5	0.03	3.48	91.27		
33.0	0.08	4.44	99.03		
32.5	0.07	6.16	97.56		
32.0	0.10	12.19	103.40		
31.5	0.11	12.76	102.50		
31.0	0.14	12.81	101.45		
30.5	0.25	14.07	99.04		
30.0	0.30	15.69	94.39		
29.5	0.57	17.98	82.35		
29.0	1.49	22.26	83.74		
28.5	4.06	29.45	81.57		
Pluma Térmica	7.43	30.68	78.61	2.62	0.90

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
34.0	34.41	34.88	0.47	34.66	0.20
33.5	33.55	34.42	0.87	33.93	0.21
33.0	32.92	33.93	1.01	33.38	0.22
32.5	32.41	33.54	1.13	32.93	0.23
32.0	31.98	32.96	0.98	32.45	0.22
31.5	31.50	32.75	1.26	31.95	0.23
31.0	31.01	32.04	1.03	31.41	0.21
30.5	30.44	31.53	1.09	30.80	0.21
30.0	29.90	30.97	1.07	30.32	0.19
29.5	29.43	30.30	0.87	29.75	0.17
29.0	28.91	29.76	0.85	29.20	0.16
28.5	28.44	29.12	0.68	28.71	0.15
Pluma Térmica	28.44	34.91	6.48	29.34	1.10

Figura 60. Características de la Pluma Térmica obtenida el 25 de enero del 2017.

En cuanto a las temperaturas máximas y mínimas de las isotermas que conforman las plumas térmicas, se pudo observar que la PT del 17 de mayo presenta una isoterma máxima de 35.0°C, una isoterma mínima de 30.5°C y una temperatura promedio de 31.69°C

con una razón de dispersión de 1.21°C, siendo la pluma térmica de mayor intensidad térmica en este año (Figura 61).



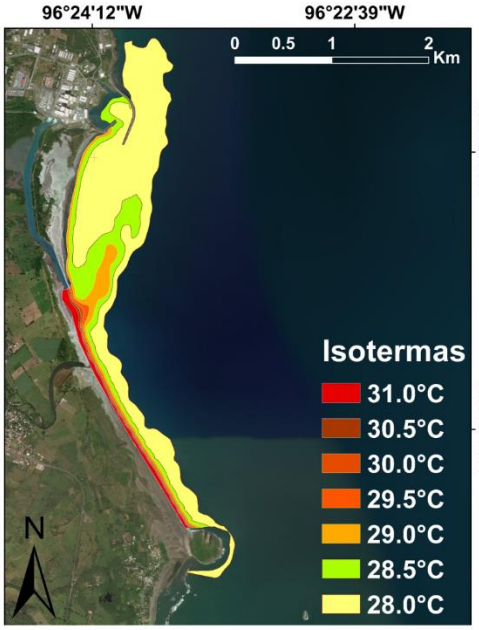
Pluma Térmica 17 de mayo de 2017					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
35.0	0.05	3.27	108.12		
34.5	0.02	3.47	106.65		
34.0	0.03	7.36	113.07		
33.5	0.09	11.12	107.65		
33.0	0.11	12.24	106.99		
32.5	0.14	14.01	103.66		
32.0	0.18	14.50	102.91		
31.5	0.23	14.67	101.90		
31.0	0.42	16.89	95.03		
30.5	0.83	21.25	100.33		
Pluma Térmica	2.45	23.06	100.91	2.02	0.39

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
35.0	35.41	38.64	3.23	36.62	0.79
34.5	34.77	35.72	0.95	35.20	0.27
34.0	34.19	35.47	1.29	34.81	0.34
33.5	33.52	34.81	1.30	34.03	0.36
33.0	32.98	34.29	1.31	33.50	0.33
32.5	32.46	33.79	1.33	32.95	0.29
32.0	31.96	33.14	1.18	32.38	0.24
31.5	31.46	32.45	0.99	31.88	0.20
31.0	30.86	31.99	1.13	31.26	0.21
30.5	30.42	31.36	0.94	30.77	0.17
Pluma Térmica	30.34	37.80	7.46	31.69	1.21

Figura 61. Características de la Pluma Térmica obtenida el 17 de mayo de 2017.

Año 2018

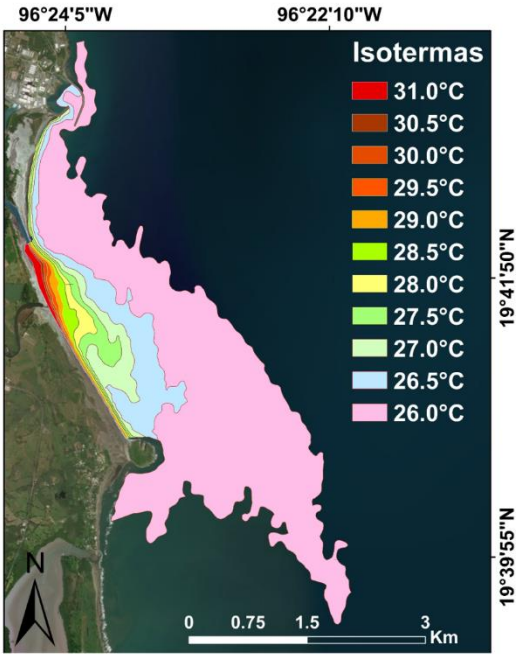
Para el año 2018 se obtuvieron un total de 14 imágenes del satélite Landsat-8, distribuidas en los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, noviembre y diciembre. Del total de las imágenes, ocho pertenecen al período de lluvias y el resto al período de secas. Respecto a las dimensiones espaciales en este año, el área y el perímetro se encuentran en los rangos de 2.74 km² a 9.62 km² y 13.44 km a 39.01 km respectivamente, siendo las plumas térmicas del 2 de abril (Figura 62) y 17 de marzo (Figura 63) las de menor y mayor área, mientras que las plumas térmicas del 8 de agosto (Figura 64) y 20 de mayo (Figura 65) presentan el menor y el mayor perímetro.



Pluma Térmica 02 de abril de 2018					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31.0	0.09	7.50	115.45		
30.5	0.03	7.47	115.12		
30.0	0.04	7.54	114.73		
29.5	0.05	7.68	113.92		
29.0	0.19	13.97	101.24		
28.5	0.45	18.75	95.25		
28.0	1.63	22.12	92.55		
Pluma Térmica	2.74	21.60	93.44	1.93	0.45

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.0	31.09	34.02	2.93	32.20	0.66
30.5	30.50	31.50	1.00	31.00	0.25
30.0	30.04	30.78	0.74	30.46	0.21
29.5	29.44	30.46	1.02	29.90	0.21
29.0	28.90	29.93	1.03	29.32	0.24
28.5	28.40	29.33	0.93	28.75	0.19
28.0	27.96	28.74	0.78	28.23	0.15
Pluma Térmica	27.96	34.82	6.87	28.80	1.06

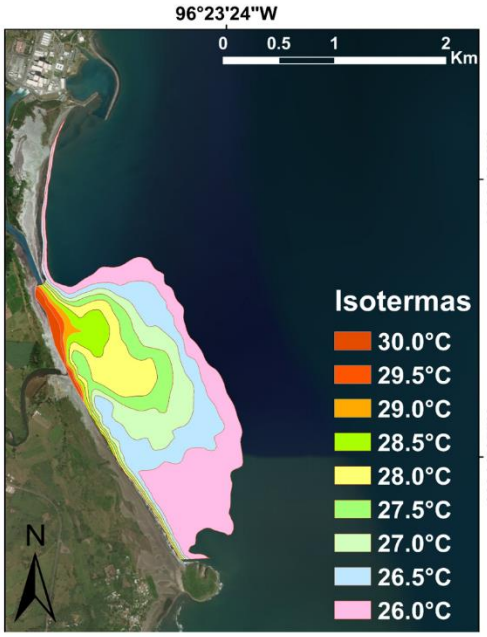
Figura 62. Características de la Pluma Térmica obtenida el 2 de abril del 2018.



Pluma Térmica 17 de marzo de 2018					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31.0	0.06	3.13	108.78		
30.5	0.04	5.68	112.98		
30.0	0.04	6.38	112.93		
29.5	0.05	6.67	112.25		
29.0	0.07	6.89	111.25		
28.5	0.11	7.28	110.30		
28.0	0.17	10.82	107.94		
27.5	0.28	13.69	108.65		
27.0	0.48	15.29	108.28		
26.5	1.07	17.90	109.96		
26.0	6.85	38.17	118.94		
Pluma Térmica	9.62	38.18	120.34	3.01	1.02

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.0	31.24	33.56	2.32	32.25	0.58
30.5	30.77	31.82	1.05	31.22	0.28
30.0	30.21	31.39	1.18	30.70	0.29
29.5	29.60	30.76	1.16	30.14	0.29
29.0	29.09	30.32	1.24	29.53	0.28
28.5	28.54	29.63	1.09	28.89	0.24
28.0	27.99	29.14	1.14	28.40	0.22
27.5	27.47	28.43	0.97	27.80	0.23
27.0	26.99	27.82	0.84	27.29	0.18
26.5	26.46	27.22	0.76	26.75	0.16
26.0	25.91	26.59	0.69	26.20	0.13
Pluma Térmica	25.91	33.33	7.42	26.63	0.99

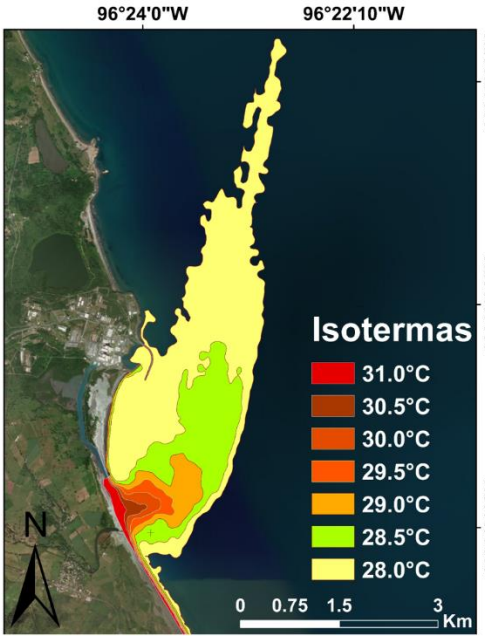
Figura 63. Características de la Pluma Térmica obtenida el 17 de marzo del 2018.



Pluma Térmica 08 de agosto de 2018					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
30.0	0.05	2.76	108.89		
29.5	0.03	3.09	107.18		
29.0	0.04	3.53	105.09		
28.5	0.13	5.90	99.89		
28.0	0.32	11.09	109.33		
27.5	0.29	12.09	108.08		
27.0	0.41	12.71	100.72		
26.5	0.57	15.47	105.36		
26.0	0.90	15.01	106.58		
Pluma Térmica	2.85	13.44	114.57	1.51	0.60

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
30.0	30.12	31.64	1.53	30.75	0.36
29.5	29.63	30.56	0.93	30.03	0.20
29.0	29.02	30.10	1.08	29.43	0.25
28.5	28.47	29.48	1.01	28.84	0.21
28.0	27.94	28.95	1.01	28.32	0.19
27.5	27.41	28.37	0.96	27.80	0.19
27.0	26.95	27.90	0.95	27.28	0.17
26.5	26.41	27.63	1.22	26.79	0.18
26.0	25.99	26.95	0.96	26.26	0.16
Pluma Térmica	25.99	31.64	5.66	27.27	1.08

Figura 64. Características de la Pluma Térmica obtenida el 8 de agosto del 2018.



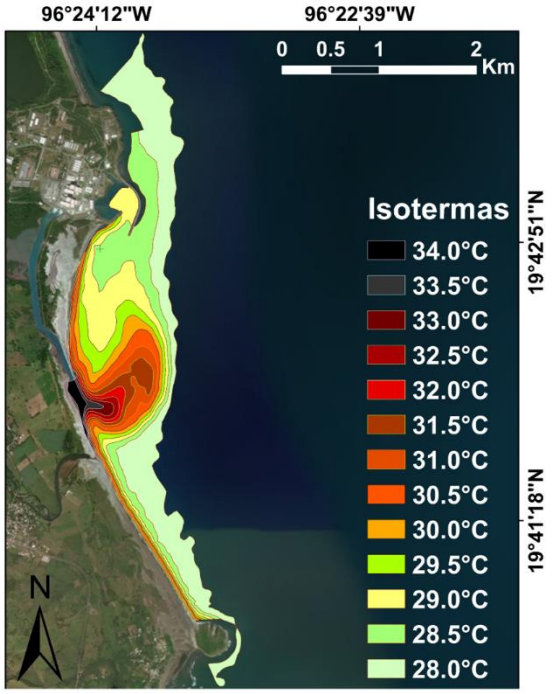
Pluma Térmica 20 de mayo de 2018					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31.0	0.15	7.50	114.23		
30.5	0.10	7.67	109.27		
30.0	0.16	8.78	103.63		
29.5	0.22	10.10	98.64		
29.0	0.60	17.07	97.87		
28.5	2.06	26.48	68.28		
28.0	5.31	47.89	70.29		
Pluma Térmica	8.75	39.01	72.60	3.23	0.86

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.0	31.03	34.75	3.72	32.51	0.84
30.5	30.52	31.65	1.13	30.91	0.28
30.0	29.99	31.09	1.10	30.33	0.24
29.5	29.51	30.44	0.94	29.81	0.20
29.0	28.96	30.04	1.08	29.30	0.19
28.5	28.45	29.38	0.93	28.75	0.15
28.0	27.49	28.84	1.35	28.15	0.18
Pluma Térmica	27.49	34.27	6.78	28.58	0.81

Figura 65. Características de la Pluma Térmica obtenida el 20 de mayo del 2018.

En cuanto a la dirección de la dispersión, seis plumas térmicas se orientan hacia el norte (2 y 18 de abril (Figura 66), 4 de mayo (Figura 67), 5 de junio (Figura 68), 25 de septiembre (Figura 69) y 12 de noviembre (Figura 70)), cuatro hacia el sureste (17 de marzo, 8 y 24 de agosto y 30 de diciembre (Figura 71)), tres hacia el noreste (1 de marzo (Figura 72), 20 de mayo y

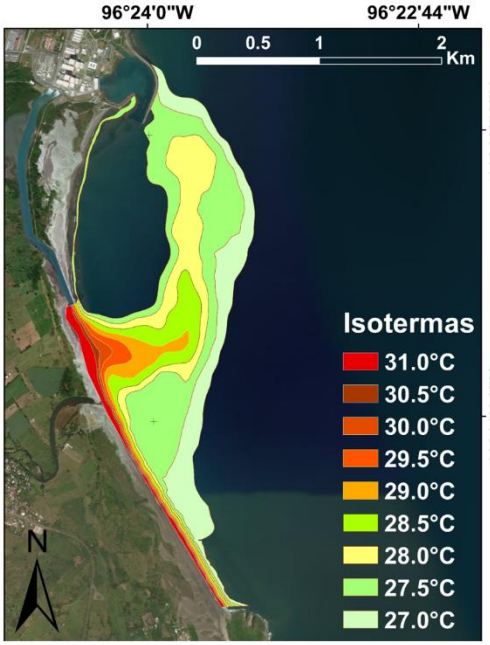
23 de julio (Figura 73)) y una hacia el este (9 de septiembre (Figura 74)). El proceso de recirculación en el 2018 se pone de manifiesto en 10 plumas térmicas (72% del total de imágenes), de las cuales siete (2 y 18 de abril, 5 de junio, 23 de julio, 24 de agosto, 9 y 25 de septiembre) inciden con valores de temperatura mayores en la obra de toma (28.5°C, 29.0°C, 30.0°C, 30.0°C, 30.5°C, 29.5°C y 28.5°C), mientras que cinco plumas térmicas (17 de marzo, 20 de mayo y 30 de diciembre) llegan a incidir con valores menores de temperaturas (26.5°C, 28.0°C y 25.0°C) respectivamente.



Pluma Térmica 18 de abril de 2018					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
34.0	0.04	1.79	105.45		
33.5	0.02	3.41	100.39		
33.0	0.04	4.34	97.69		
32.5	0.06	11.36	106.79		
32.0	0.08	12.00	106.30		
31.5	0.17	13.91	100.24		
31.0	0.19	15.43	99.97		
30.5	0.19	15.80	98.30		
30.0	0.22	16.91	98.70		
29.5	0.27	16.75	99.13		
29.0	0.54	17.28	94.81		
28.5	0.68	16.79	91.11		
28.0	1.35	20.62	91.75		
Pluma Térmica	4.13	24.87	91.85	2.49	0.53

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
34.0	34.15	37.05	2.91	35.50	0.78
33.5	33.61	34.84	1.24	34.07	0.37
33.0	33.01	34.51	1.50	33.44	0.30
32.5	32.40	33.88	1.49	33.12	0.39
32.0	31.87	33.30	1.43	32.54	0.35
31.5	31.38	32.87	1.49	31.85	0.34
31.0	30.89	32.21	1.32	31.40	0.28
30.5	30.43	31.63	1.20	30.89	0.26
30.0	29.94	31.18	1.24	30.38	0.26
29.5	29.43	30.52	1.09	29.83	0.21
29.0	28.76	29.85	1.08	29.26	0.19
28.5	28.41	29.27	0.86	28.77	0.16
28.0	27.98	28.66	0.68	28.23	0.15
Pluma Térmica	27.98	37.01	9.03	29.57	1.60

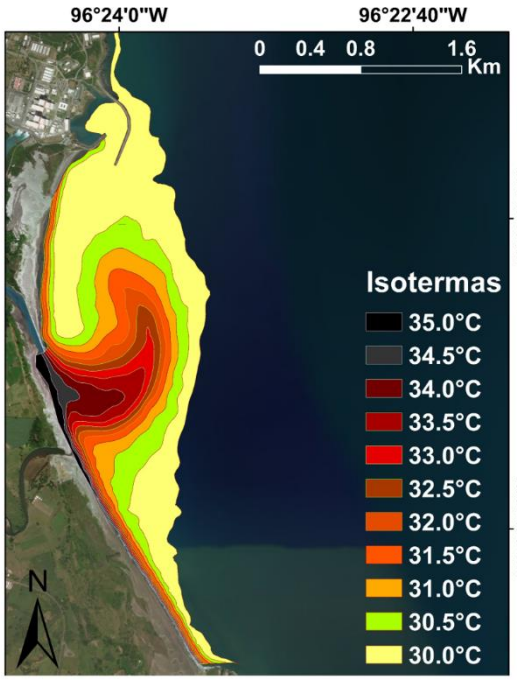
Figura 66. Características de la Pluma Térmica obtenida el 18 de abril del 2018.



Pluma Térmica 04 de mayo de 2018					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31.0	0.09	7.40	115.01		
30.5	0.03	7.39	113.90		
30.0	0.05	7.58	112.33		
29.5	0.07	8.05	109.70		
29.0	0.14	9.51	102.52		
28.5	0.27	11.50	81.77		
28.0	0.49	15.41	81.43		
27.5	0.94	23.42	84.20		
27.0	0.56	13.28	85.18		
Pluma Térmica	3.88	16.15	91.11	1.83	0.68

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.0	31.23	34.58	3.35	32.58	0.73
30.5	30.72	31.92	1.20	31.26	0.35
30.0	30.09	31.27	1.18	30.66	0.37
29.5	29.54	30.61	1.07	29.96	0.29
29.0	29.00	30.34	1.35	29.31	0.28
28.5	28.45	29.59	1.14	28.81	0.20
28.0	27.91	29.06	1.15	28.25	0.19
27.5	27.38	28.47	1.09	27.75	0.18
27.0	27.03	27.77	0.74	27.28	0.15
Pluma Térmica	25.99	34.17	8.19	27.85	1.26

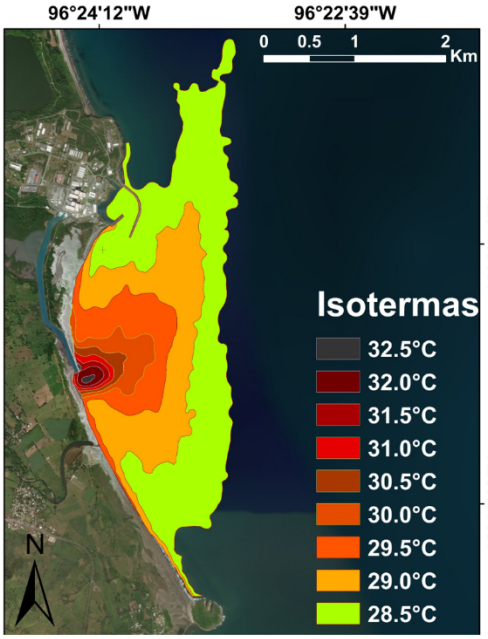
Figura 67. Características de la Pluma Térmica obtenida el 4 de mayo del 2018.



Pluma Térmica 05 de junio de 2018					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
35.0	0.05	3.30	109.03		
34.5	0.06	7.60	112.51		
34.0	0.11	8.57	107.82		
33.5	0.13	9.76	100.84		
33.0	0.12	10.81	93.59		
32.5	0.16	14.48	96.56		
32.0	0.19	15.05	94.98		
31.5	0.25	15.64	94.61		
31.0	0.37	16.27	93.49		
30.5	0.57	17.82	96.45		
30.0	1.46	19.40	95.96		
Pluma Térmica	3.65	18.09	93.75	1.98	0.59

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
35.0	35.10	37.18	2.08	35.87	0.48
34.5	34.48	35.61	1.13	34.83	0.24
34.0	33.97	35.01	1.03	34.30	0.20
33.5	33.38	34.45	1.07	33.82	0.19
33.0	32.88	33.87	0.98	33.31	0.22
32.5	32.35	33.66	1.31	32.85	0.27
32.0	31.86	33.31	1.45	32.33	0.27
31.5	31.38	32.65	1.27	31.80	0.23
31.0	30.91	32.12	1.21	31.27	0.20
30.5	30.32	31.51	1.19	30.77	0.19
30.0	29.66	30.80	1.14	30.21	0.19
Pluma Térmica	29.66	37.83	8.17	31.37	1.47

Figura 68. Características de la Pluma Térmica obtenida el 5 de junio del 2018.

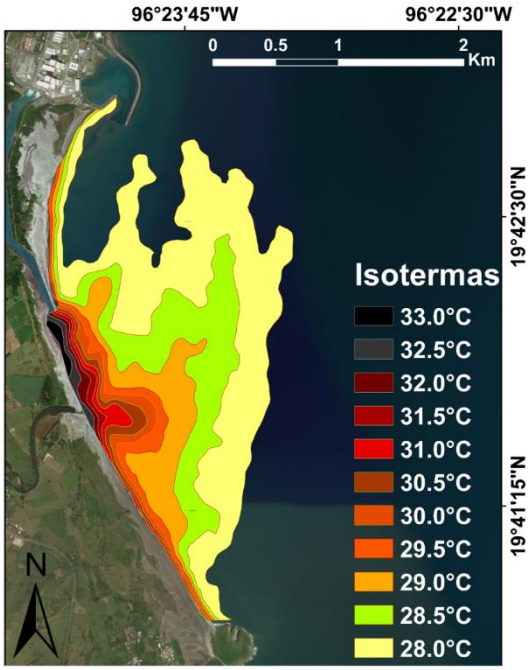


Pluma Térmica 25 de septiembre de 2018

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
32.5	0.01	0.48	19.95		
32.0	0.04	1.50	15.89		
31.5	0.04	2.68	179.93		
31.0	0.05	3.02	137.13		
30.5	0.09	3.60	142.20		
30.0	0.29	5.63	144.55		
29.5	0.80	12.62	91.17		
29.0	1.70	19.78	82.87		
28.5	3.17	27.71	87.50		
Pluma Térmica	6.28	23.88	84.76	2.37	0.84

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
32.5	32.51	32.64	0.13	32.58	0.04
32.0	31.93	32.51	0.58	32.26	0.16
31.5	31.45	32.05	0.61	31.75	0.15
31.0	31.00	31.57	0.58	31.25	0.14
30.5	30.51	31.08	0.57	30.70	0.16
30.0	30.00	30.63	0.63	30.22	0.14
29.5	29.35	30.17	0.82	29.71	0.14
29.0	28.80	29.68	0.89	29.21	0.15
28.5	28.30	29.13	0.83	28.72	0.16
Pluma Térmica	28.30	32.64	4.34	29.16	0.64

Figura 69. Características de la Pluma Térmica obtenida el 25 de septiembre del 2018.

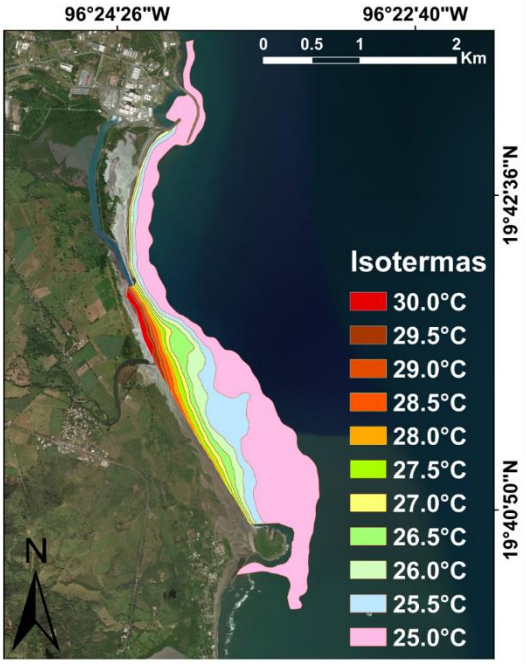


Pluma Térmica 12 de noviembre de 2018

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
33.0	0.03	1.31	108.54		
32.5	0.04	2.78	105.83		
32.0	0.04	3.05	106.08		
31.5	0.04	3.45	106.60		
31.0	0.08	7.76	110.46		
30.5	0.11	8.73	109.88		
30.0	0.13	8.87	109.24		
29.5	0.19	11.59	108.81		
29.0	0.58	13.66	106.28		
28.5	0.96	18.54	101.51		
28.0	1.92	23.78	99.35		
Pluma Térmica	4.15	19.71	93.77	1.57	0.84

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
33.0	33.02	33.71	0.69	33.34	0.19
32.5	32.58	33.41	0.84	32.92	0.20
32.0	32.11	32.75	0.63	32.43	0.16
31.5	31.61	32.18	0.57	31.92	0.15
31.0	31.00	31.93	0.93	31.40	0.21
30.5	30.49	31.59	1.10	30.90	0.23
30.0	29.98	30.97	0.99	30.38	0.21
29.5	29.50	30.46	0.97	29.84	0.21
29.0	28.89	29.84	0.95	29.27	0.16
28.5	28.44	29.28	0.84	28.75	0.16
28.0	27.87	28.74	0.86	28.24	0.16
Pluma Térmica	27.87	33.61	5.74	28.93	1.04

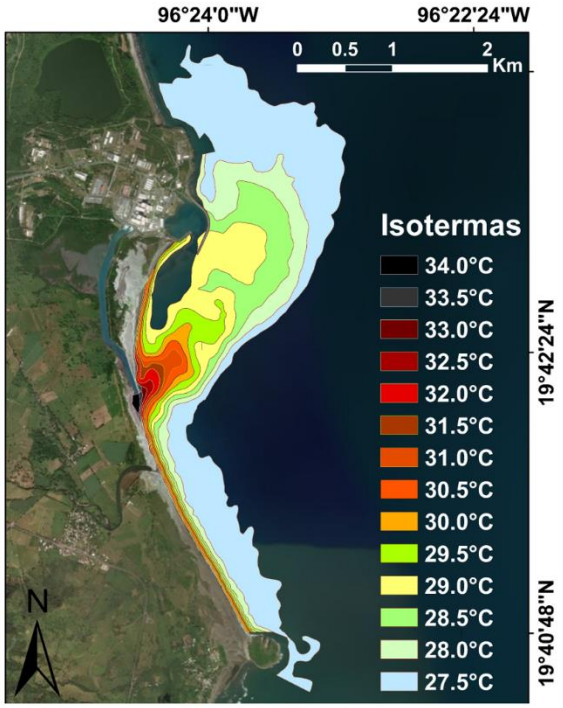
Figura 70. Características de la Pluma Térmica obtenida el 12 de noviembre del 2018.



Pluma Térmica 30 de diciembre de 2018					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
30.0	0.04	2.42	108.61		
29.5	0.03	2.93	107.66		
29.0	0.03	3.07	107.97		
28.5	0.04	4.49	108.37		
28.0	0.06	6.18	110.80		
27.5	0.07	7.06	111.54		
27.0	0.09	7.40	111.58		
26.5	0.18	10.44	109.25		
26.0	0.24	12.06	106.65		
25.5	0.43	12.69	108.22		
25.0	1.60	21.22	106.37		
Pluma Térmica	3.02	22.60	106.19	2.05	0.47

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
30.0	30.07	30.76	0.69	30.47	0.17
29.5	29.71	30.30	0.58	29.99	0.16
29.0	29.22	29.78	0.56	29.50	0.15
28.5	28.70	29.38	0.68	28.99	0.17
28.0	28.20	28.97	0.76	28.51	0.18
27.5	27.66	28.52	0.86	28.01	0.19
27.0	27.13	27.90	0.77	27.47	0.18
26.5	26.52	27.39	0.88	26.87	0.21
26.0	26.02	26.81	0.79	26.36	0.17
25.5	25.51	26.28	0.77	25.78	0.17
25.0	24.96	25.64	0.68	25.22	0.14
Pluma Térmica	24.97	30.76	5.79	25.98	1.20

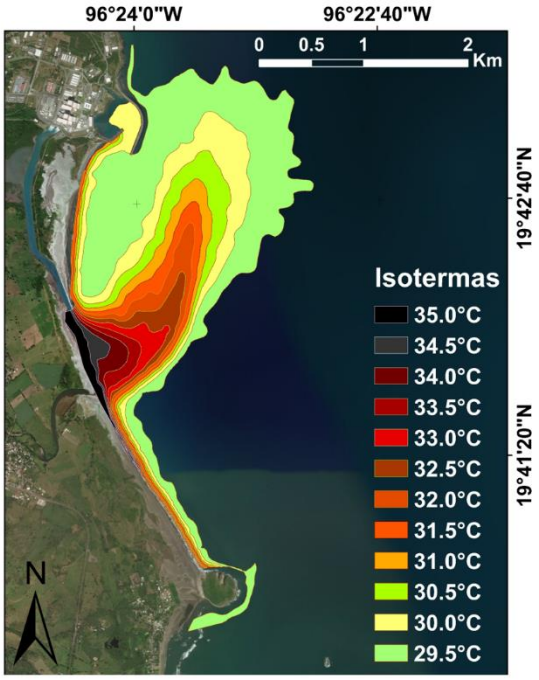
Figura 71. Características de la Pluma Térmica obtenida el 30 de diciembre del 2018.



Pluma Térmica 01 de marzo de 2018					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
34.0	0.01	0.60	95.58		
33.5	0.005	0.61	85.96		
33.0	0.01	2.78	102.40		
32.5	0.04	5.95	97.52		
32.0	0.06	10.29	106.56		
31.5	0.07	10.77	105.94		
31.0	0.09	11.67	102.76		
30.5	0.10	12.56	101.66		
30.0	0.14	14.24	98.69		
29.5	0.28	16.38	93.16		
29.0	0.76	21.44	78.66		
28.5	0.72	17.83	77.67		
28.0	0.78	20.17	81.71		
27.5	2.85	28.13	88.27		
Pluma Térmica	6.51	29.17	86.23	2.55	0.81

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
34.0	34.22	36.33	2.12	35.35	0.67
33.5	33.77	34.71	0.94	34.14	0.41
33.0	33.17	34.43	1.26	33.68	0.33
32.5	32.50	33.95	1.45	33.13	0.37
32.0	31.92	33.36	1.44	32.63	0.38
31.5	31.52	32.82	1.30	32.14	0.34
31.0	30.95	32.28	1.33	31.51	0.34
30.5	30.47	31.68	1.21	30.99	0.31
30.0	29.92	31.17	1.25	30.40	0.30
29.5	29.44	30.62	1.18	29.83	0.24
29.0	28.86	30.12	1.26	29.20	0.19
28.5	28.47	29.36	0.89	28.79	0.17
28.0	27.96	28.71	0.76	28.28	0.16
27.5	27.43	28.12	0.69	27.72	0.15
Pluma Térmica	27.43	36.20	8.77	28.66	1.30

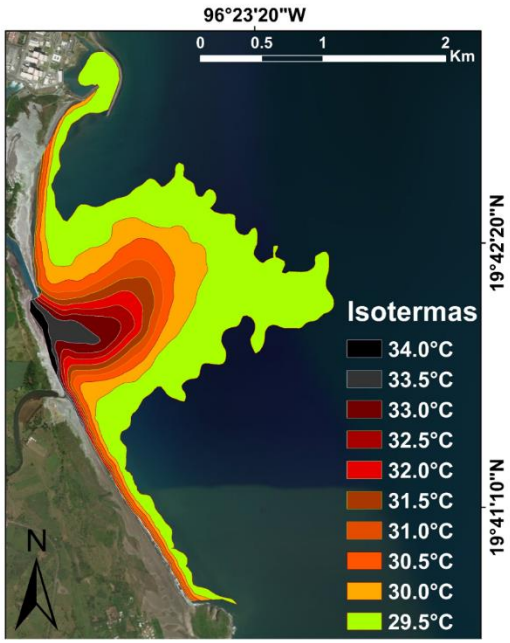
Figura 72. Características de la Pluma Térmica obtenida el 1 de marzo del 2018.



Pluma Térmica 23 de julio de 2018					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
35.0	0.09	4.02	109.72		
34.5	0.06	4.49	105.68		
34.0	0.10	7.36	107.55		
33.5	0.11	8.08	104.71		
33.0	0.14	9.17	97.33		
32.5	0.19	10.96	82.86		
32.0	0.25	16.32	83.00		
31.5	0.26	18.17	82.01		
31.0	0.32	20.02	81.56		
30.5	0.48	21.51	77.50		
30.0	0.85	24.72	78.84		
29.5	2.27	27.98	82.38		
Pluma Térmica	5.45	25.60	81.60	1.96	0.89

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
35.0	35.07	38.94	3.87	36.43	0.88
34.5	34.51	35.60	1.10	34.87	0.27
34.0	34.04	35.47	1.42	34.40	0.29
33.5	33.54	34.92	1.38	33.89	0.28
33.0	33.00	34.24	1.24	33.35	0.26
32.5	32.45	33.77	1.32	32.82	0.24
32.0	31.89	33.25	1.36	32.35	0.27
31.5	31.42	32.59	1.17	31.85	0.25
31.0	30.95	32.07	1.12	31.31	0.21
30.5	30.42	31.53	1.11	30.78	0.19
30.0	29.81	30.85	1.04	30.25	0.18
29.5	29.47	30.24	0.78	29.73	0.14
Pluma Térmica	29.33	39.41	10.08	30.91	1.61

Figura 73. Características de la Pluma Térmica obtenida el 23 de julio del 2018.



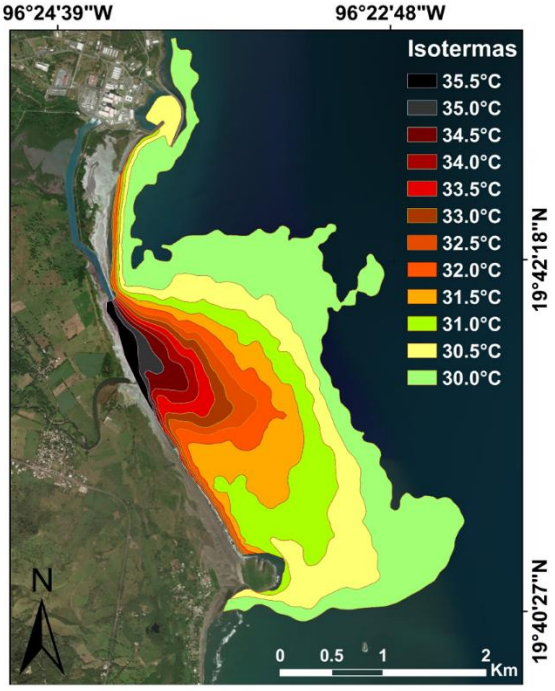
Pluma Térmica 09 de septiembre de 2018					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
34.0	0.03	1.65	107.48		
33.5	0.08	3.78	108.42		
33.0	0.11	5.09	71.73		
32.5	0.10	6.76	80.20		
32.0	0.13	10.16	96.00		
31.5	0.17	13.26	100.52		
31.0	0.21	13.99	99.25		
30.5	0.28	15.03	96.53		
30.0	0.55	16.92	95.21		
29.5	1.84	23.46	103.51		
Pluma Térmica	3.64	22.23	97.03	1.29	0.90

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
34.0	34.07	35.30	1.22	34.49	0.29
33.5	33.46	34.69	1.23	33.75	0.19
33.0	32.94	33.93	0.99	33.32	0.18
32.5	32.40	33.43	1.03	32.81	0.20
32.0	31.88	32.95	1.08	32.32	0.21
31.5	31.39	32.66	1.27	31.83	0.22
31.0	30.90	32.09	1.19	31.33	0.23
30.5	30.42	31.40	0.98	30.80	0.20
30.0	29.91	30.88	0.98	30.26	0.17
29.5	29.23	30.25	1.02	29.68	0.15
Pluma Térmica	29.23	35.13	5.90	30.56	1.26

Figura 74. Características de la Pluma Térmica obtenida el 9 de septiembre del 2018.

En cuanto a las temperaturas máximas y mínimas de las isotermas que conforman las plumas térmicas, se pudo observar que la PT del 24 de agosto presenta una isoterma máxima de 35.5°C, una isoterma mínima de 30.0°C, una temperatura promedio de 31.35°C

con una razón de dispersión de 1.40°C, siendo la pluma térmica de mayor intensidad térmica en este año (Figura 75).



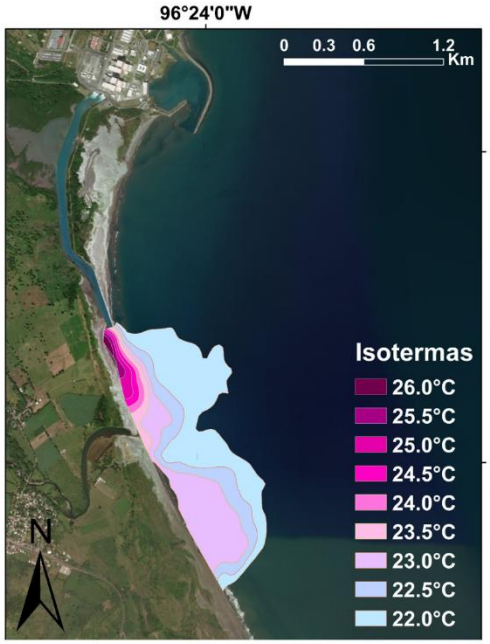
Pluma Térmica 24 de agosto de 2018					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
35.5	0.10	3.05	109.15		
35.0	0.09	3.71	109.91		
34.5	0.14	4.66	115.44		
34.0	0.15	8.83	106.68		
33.5	0.18	9.38	106.04		
33.0	0.21	11.94	110.88		
32.5	0.27	13.00	113.15		
32.0	0.40	14.26	114.13		
31.5	0.87	16.14	109.74		
31.0	1.16	18.81	109.15		
30.5	1.37	21.02	111.13		
30.0	2.80	29.58	116.16		
Pluma Térmica	7.99	30.60	114.21	2.50	1.02

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
35.5	35.59	37.55	1.96	36.38	0.52
35.0	35.00	35.74	0.74	35.27	0.17
34.5	34.52	35.28	0.76	34.79	0.16
34.0	33.98	34.70	0.72	34.31	0.16
33.5	33.45	34.31	0.86	33.79	0.17
33.0	32.91	34.40	1.49	33.32	0.22
32.5	32.48	33.77	1.29	32.82	0.21
32.0	31.94	33.09	1.15	32.25	0.18
31.5	31.42	32.51	1.09	31.75	0.17
31.0	30.91	32.03	1.12	31.27	0.15
30.5	30.11	31.29	1.17	30.75	0.17
30.0	29.94	31.31	1.37	30.21	0.15
Pluma Térmica	29.94	37.44	7.51	31.35	1.40

Figura 75. Características de la Pluma Térmica obtenida el 24 de agosto del 2018.

Año 2019

En el último año del período analizado en esta investigación se obtuvieron un total de 8 imágenes, que representan los meses de enero, febrero, abril, mayo, junio y julio. Del total de las imágenes en el 2019, cinco pertenecen al período de lluvias y tres al período de secas. Respecto a las dimensiones espaciales de las plumas térmicas, el área y el perímetro se encuentran en los intervalos de 1.18 km² a 8.23 km² y de 7.50 km a 40.35 km respectivamente; perteneciendo los límites inferiores de los intervalos a la PT del 31 de enero (Figura 76) y los límites superiores a la PT del 7 de mayo (Figura 77).

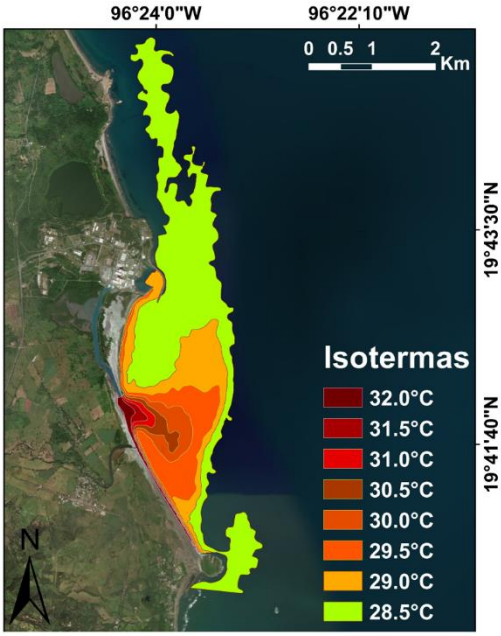


Pluma Térmica 31 de enero de 2019

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
26.0	0.01	0.48	116.22		
25.5	0.01	1.02	110.17		
25.0	0.02	1.59	106.34		
24.5	0.02	1.86	107.00		
24.0	0.02	2.02	106.44		
23.5	0.04	2.87	100.87		
23.0	0.33	6.27	117.76		
22.5	0.20	7.25	119.53		
22.0	0.52	8.33	112.79		
Pluma Térmica	1.18	7.50	113.28	1.05	0.36

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
26.0	26.22	26.38	0.16	26.31	0.06
25.5	25.60	26.34	0.74	26.03	0.20
25.0	24.91	25.91	0.99	25.39	0.26
24.5	24.59	25.47	0.88	25.01	0.23
24.0	24.06	24.98	0.92	24.49	0.26
23.5	23.53	24.62	1.09	23.98	0.27
23.0	22.92	23.92	1.00	23.35	0.16
22.5	22.41	23.57	1.16	22.84	0.17
22.0	21.47	22.67	1.20	22.20	0.19
Pluma Térmica	21.47	26.38	4.91	22.91	0.86

Figura 76. Características de la Pluma Térmica obtenida el 31 de enero del 2019.



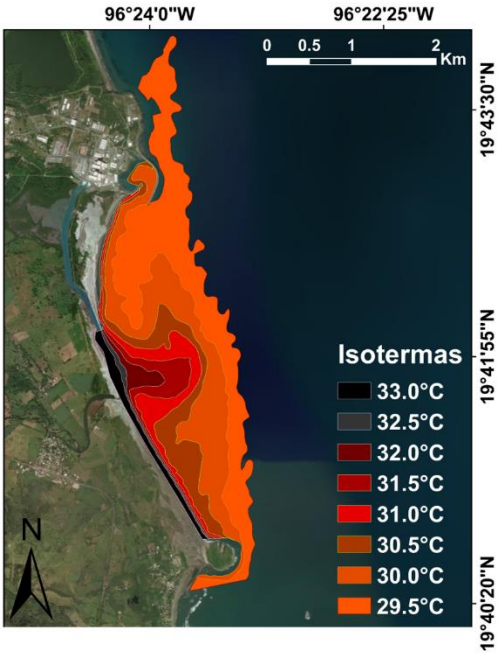
Pluma Térmica 07 de mayo de 2019

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
32.0	0.11	7.55	113.46		
31.5	0.08	7.98	109.85		
31.0	0.10	8.64	107.33		
30.5	0.22	13.87	108.81		
30.0	0.45	16.93	106.47		
29.5	1.09	17.29	93.22		
29.0	1.25	19.70	96.29		
28.5	4.66	41.08	95.56		
Pluma Térmica	8.23	40.35	92.74	3.43	0.76

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
32.0	32.06	34.92	2.86	33.17	0.67
31.5	31.47	32.82	1.34	31.94	0.34
31.0	30.97	32.28	1.31	31.44	0.33
30.5	30.44	31.67	1.23	30.79	0.29
30.0	29.94	30.97	1.04	30.32	0.19
29.5	29.27	30.44	1.17	29.71	0.16
29.0	28.97	29.76	0.79	29.26	0.15
28.5	28.35	29.16	0.82	28.68	0.15
Pluma Térmica	28.35	34.92	6.58	29.23	0.89

Figura 77. Características de la Pluma Térmica obtenida el 7 de mayo del 2019.

Por otra parte, en cuanto a la dirección de la dispersión, cuatro plumas térmicas se orientan hacia el norte (21 de abril, 7 de mayo, 8 de junio (Figura 78) y 24 de junio (Figura 79)), dos plumas térmicas hacia el sureste (16 de febrero (Figura 80) y 10 de julio (Figura 81)) y dos plumas térmicas hacia del este (31 de enero y 23 de mayo (Figura 82)).

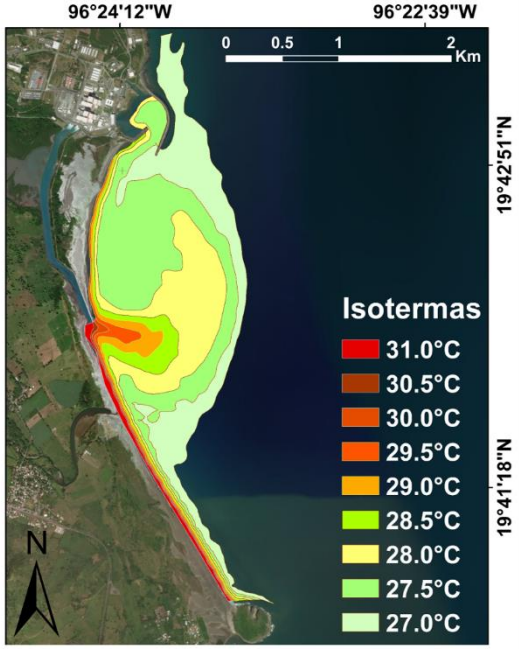


Pluma Térmica 08 de junio de 2019

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
33.0	0.19	7.56	115.39		
32.5	0.06	7.53	113.85		
32.0	0.15	8.57	110.79		
31.5	0.32	14.29	106.95		
31.0	0.46	15.55	101.55		
30.5	1.45	20.47	106.18		
30.0	0.72	17.93	101.66		
29.5	2.18	24.67	100.35		
Pluma Térmica	5.85	26.00	98.35	2.69	0.69

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
33.0	33.14	37.47	4.32	34.91	1.08
32.5	32.51	33.39	0.88	32.95	0.23
32.0	32.02	32.91	0.90	32.30	0.20
31.5	31.48	32.44	0.96	31.80	0.19
31.0	30.97	31.98	1.01	31.30	0.18
30.5	29.83	30.73	0.89	30.26	0.15
30.0	30.47	31.37	0.90	30.75	0.17
29.5	29.47	30.53	1.06	29.76	0.16
Pluma Térmica	29.48	37.45	7.97	30.62	1.20

Figura 78. Características de la Pluma Térmica obtenida el 8 de junio del 2019.

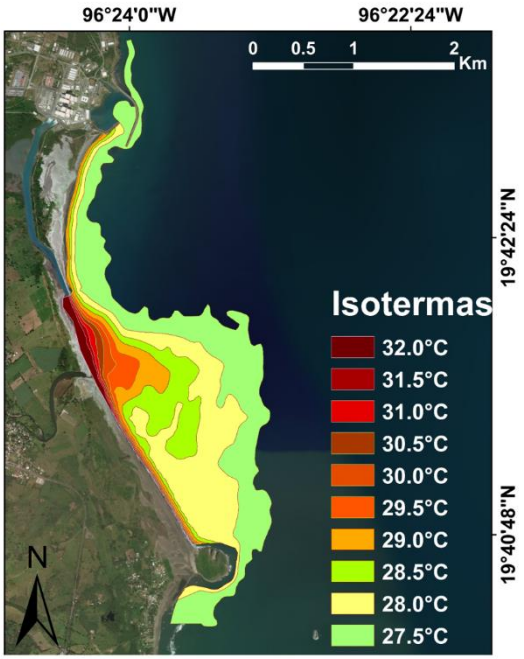


Pluma Térmica 24 de junio de 2019

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31.0	0.07	7.46	115.81		
30.5	0.03	7.54	114.86		
30.0	0.03	7.77	113.43		
29.5	0.09	12.08	105.44		
29.0	0.15	13.22	104.83		
28.5	0.23	15.02	102.26		
28.0	1.24	20.62	95.85		
27.5	0.79	19.50	90.68		
27.0	0.98	18.64	90.03		
Pluma Térmica	3.81	18.77	91.34	1.93	0.63

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.0	31.22	34.10	2.88	32.37	0.70
30.5	30.61	31.40	0.79	31.07	0.20
30.0	29.98	30.85	0.86	30.49	0.22
29.5	29.49	30.77	1.29	29.96	0.31
29.0	28.89	30.09	1.21	29.35	0.24
28.5	28.41	29.63	1.22	28.83	0.22
28.0	27.02	28.25	1.23	27.63	0.25
27.5	27.85	28.86	1.01	28.25	0.16
27.0	26.91	27.63	0.73	27.28	0.15
Pluma Térmica	26.91	34.67	7.76	28.11	1.11

Figura 79. Características de la Pluma Térmica obtenida el 24 de junio del 2019.

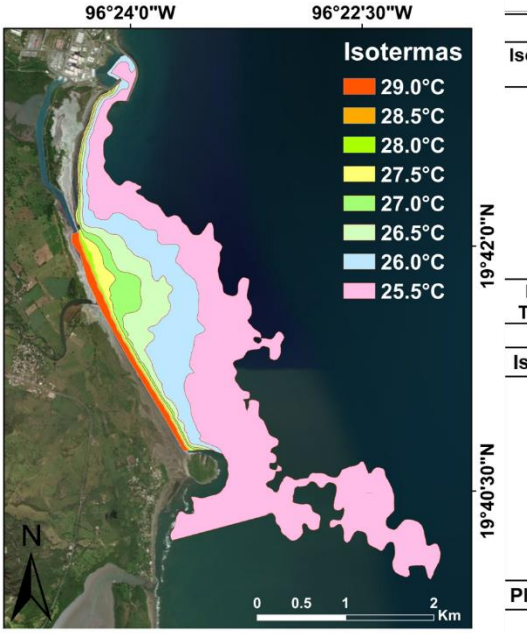


Pluma Térmica 16 de febrero de 2019

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
32.0	0.07	3.52	109.54		
31.5	0.04	7.28	113.72		
31.0	0.05	7.36	112.90		
30.5	0.06	7.42	111.90		
30.0	0.07	7.63	110.85		
29.5	0.16	12.32	104.57		
29.0	0.23	13.60	106.22		
28.5	0.55	17.39	108.47		
28.0	1.18	20.54	106.97		
27.5	1.62	23.66	107.13		
Pluma Térmica	4.33	24.66	105.83	2.08	0.66

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
32.0	32.15	35.24	3.09	33.46	0.82
31.5	31.59	32.38	0.79	31.95	0.21
31.0	31.09	31.98	0.89	31.43	0.20
30.5	30.46	31.33	0.88	30.88	0.21
30.0	30.01	30.93	0.92	30.35	0.20
29.5	29.44	30.84	1.40	29.87	0.24
29.0	28.87	30.21	1.34	29.32	0.24
28.5	28.45	29.50	1.06	28.73	0.18
28.0	27.92	28.93	1.01	28.25	0.17
27.5	27.44	28.67	1.23	27.75	0.18
Pluma Térmica	27.48	35.24	7.76	28.60	1.23

Figura 80. Características de la Pluma Térmica obtenida el 16 de febrero del 2019.

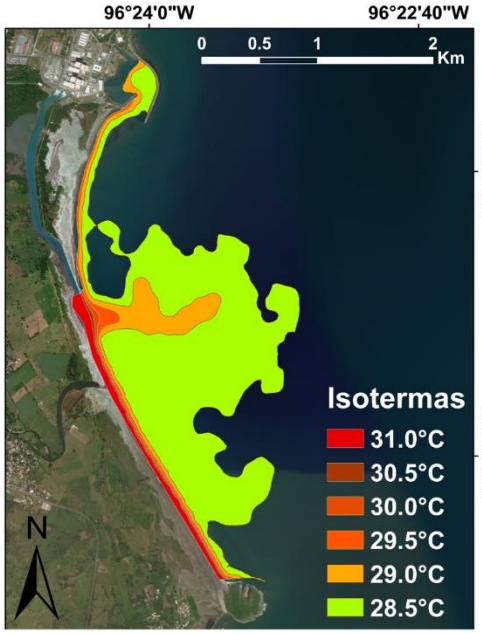


Pluma Térmica 10 de julio de 2019

Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
29.0	0.17	7.49	115.98		
28.5	0.03	6.16	115.23		
28.0	0.05	6.74	114.65		
27.5	0.14	11.06	105.17		
27.0	0.27	12.32	105.46		
26.5	0.53	13.58	105.98		
26.0	3.74	33.81	119.07		
25.5	1.06	16.24	104.77		
Pluma Térmica	6.42	34.89	119.38	2.51	0.82

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
29.0	29.43	35.12	5.69	31.98	1.41
28.5	28.90	29.98	1.09	29.45	0.30
28.0	28.05	29.36	1.31	28.73	0.32
27.5	27.49	28.70	1.21	27.94	0.29
27.0	26.96	28.11	1.15	27.36	0.21
26.5	26.41	27.37	0.96	26.77	0.18
26.0	25.45	26.15	0.70	25.70	0.15
25.5	25.89	26.70	0.81	26.25	0.15
Pluma Térmica	25.45	35.11	9.66	26.33	1.30

Figura 81. Características de la Pluma Térmica obtenida el 10 de julio del 2019.



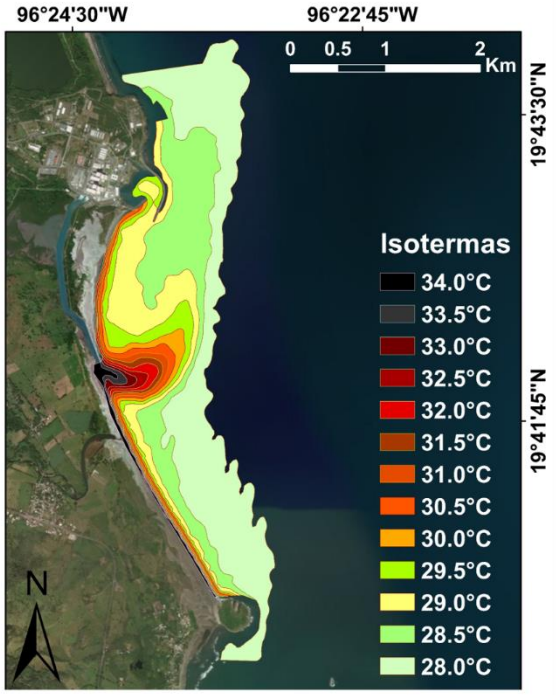
Pluma Térmica 23 de mayo de 2019					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
31.0	0.13	7.53	115.32		
30.5	0.03	7.44	114.72		
30.0	0.04	7.62	114.11		
29.5	0.10	12.54	102.56		
29.0	2.51	25.33	99.41		
28.5	0.36	16.92	99.08		
Pluma Térmica	3.31	23.81	102.33	1.53	0.69

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
31.0	31.21	35.23	4.02	32.74	0.94
30.5	30.70	31.50	0.80	31.07	0.21
30.0	29.97	30.96	0.99	30.52	0.22
29.5	29.43	30.53	1.10	29.97	0.24
29.0	28.24	29.24	1.00	28.66	0.17
28.5	28.91	29.89	0.98	29.24	0.19
Pluma Térmica	28.24	35.47	7.23	29.06	1.02

Figura 82. Características de la Pluma Térmica obtenida el 23 de mayo del 2019.

El proceso de recirculación en este año se pone en evidencia en 11 plumas térmicas (85% del total de las imágenes del 2019), de las cuales cinco (21 de abril, 7 y 23 de mayo, 8 de junio y 27 de agosto) influyen con valores de temperatura mayores en la obra de toma (29.5°C, 29.0°C, 29.0°C, 30.5°C y 29.0°C); mientras que las plumas térmicas (16 de febrero, 24 de junio, 10 de julio, 11 de agosto, 30 de octubre y 1 de diciembre) llegan a influir en la obra de toma pero con valores menores de temperatura (27.5°C, 28.0°C, 26.0°C, 26.5°C, 24.5°C y 27.5°C) respectivamente.

En cuanto a las temperaturas máximas y mínimas de las isotermas que conforman las plumas térmicas, se pudo observar que la PT del 21 de abril presenta una isoterma máxima de 34.0°C, una isoterma mínima de 28.0°C y una temperatura promedio de 29.25°C con una razón de dispersión de 1.50°C, siendo la pluma térmica de mayor intensidad térmica en este año (Figura 83). Por otra parte la PT del 31 de enero presenta el rango de isotermas mínimo en este año, oscilando entre 26.0°C y 22.0°C (Figura 76).



Pluma Térmica 21 de abril de 2019					
Isotermas (°C)	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Eje Mayor (Km)	Eje Menor (Km)
34.0	0.08	7.87	114.09		
33.5	0.04	8.03	110.91		
33.0	0.05	8.40	109.60		
32.5	0.07	11.80	105.95		
32.0	0.09	12.62	104.71		
31.5	0.09	13.14	104.57		
31.0	0.10	14.02	102.38		
30.5	0.13	14.60	100.94		
30.0	0.19	15.39	99.59		
29.5	0.38	18.45	95.19		
29.0	0.85	20.08	92.79		
28.5	1.44	18.91	88.01		
28.0	2.51	22.76	91.11		
Pluma Térmica	6.42	26.79	91.96	2.91	0.70

Isotermas (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Rango (°C)	Media (°C)	STD (°C)
34.0	34.07	37.83	3.76	35.56	0.96
33.5	33.59	35.02	1.43	34.09	0.41
33.0	33.05	34.36	1.32	33.62	0.40
32.5	32.52	33.76	1.25	33.07	0.36
32.0	31.97	33.37	1.41	32.53	0.37
31.5	31.48	32.71	1.23	32.02	0.30
31.0	30.98	32.08	1.11	31.53	0.31
30.5	30.48	31.54	1.06	30.93	0.24
30.0	29.95	30.93	0.98	30.37	0.22
29.5	29.44	30.39	0.95	29.79	0.18
29.0	28.98	29.70	0.72	29.26	0.15
28.5	28.47	29.14	0.67	28.78	0.15
28.0	27.94	29.02	1.08	28.24	0.16
Pluma Térmica	27.94	38.19	10.25	29.25	1.50

Figura 83. Características de la Pluma Térmica obtenida el 21 de abril del 2019.

7.2.4. Relación entre la dirección de la dispersión de las plumas térmicas y las corrientes marinas.

En la presente invetigación desde un inicio existió la necesidad de estudiar y analizar el comportamiento de la dirección de la dispersión que adquieren las plumas térmicas que se generan por el proceso de descarga del agua de refrigeración en la CNLV. Es por ello que se decidió analizar la dirección de las corrientes marinas que podrían estar influyendo en la orientación de las plumas térmicas.

Para generar las condiciones oceanográficas referentes a las corrientes marinas principalmente, se utilizó información del modelo oceanográfico HYCOM (Anexo 3). Lo que hoy en día se está haciendo por el Consorcio HYCOM en los Estados Unidos, es una enorme inversión de recursos tanto económicos como humanos para desarrollar un experimento de asimilación de datos en el océano global (GODAE por sus siglas en inglés) utilizando el HYCOM. El objetivo de este experimento es describir numéricamente el estado del océano en 3D, con resoluciones finas y en tiempo real, asimilando los cálculos con datos medidos.

Gracias a este experimento, existe en línea una cantidad importante de información para generar simulaciones numéricas regionales. En particular, nuestro interés en la región del

Golfo de México sobre el litoral de Veracruz. De hecho, es posible obtener resultados de simulaciones numéricas realizadas en los Estados Unidos de forma continua, desde enero del 2003 (Anexo 4). Mediante la descarga de archivos NetcdfSubset (Anexo 5) es posible visualizar la información asimilada del HYCOM a través del QUICKPLOT del modelo Delft3D FLOW de Delft Holanda, donde se pueden generar animaciones de diferentes parámetros hidrodinámicos del Golfo de México. La manipulación de datos a través de este Software permite incluso generar patrones tridimensionales en cualquier punto de una malla con resolución de 1/12 grados (150 m aproximadamente).

Según la disponibilidad del Consorcio HYCOM, se obtuvieron las direcciones de las corrientes marinas asociadas a cada fecha de las imágenes Landsat-8 estudiadas y analizadas en la presente investigación. Es importante destacar que de las imágenes obtenidas del HYCOM solo dos imágenes (5 de mayo de 2013 y 3 de marzo de 2018), no coinciden con exactitud en las fechas de descargas del satélite Landsat-8 (22 de mayo de 2013 y 1 de marzo de 2018). En cuanto a la hora de simulación de las imágenes HYCOM (12:00 horas), existe una diferencia que oscila entre 11 minutos y 14 minutos de diferencia respecto a la hora de las imágenes obtenidas del Landsat-8, ya que la hora de captura de las imágenes en el período 2013-2019 está en el rango de 11:46 am y 11:49 am. A continuación, se muestra un análisis de la relación que existe entre la dirección de las plumas térmicas y la dirección de las corrientes marinas simuladas por el Consorcio HYCOM para el período 2013-2019.

Año 2013

En el año 2013 debido a la poca disponibilidad de imágenes, se dificultó el análisis al igual que en el subepígrafe anterior. En este caso, se obtuvo una relación de influencia positiva, entre las corrientes marinas y la dirección de la dispersión de las plumas térmicas, en tres de las cuatro imágenes analizadas 22 de mayo (Figura 84), 25 de julio (Figura 85) y 13 de octubre (Figura 86), lo que representa aproximadamente el 75%, como se muestra en la Tabla 16. En la Figura 87 se muestra la inexistencia de una influencia positiva entre las corrientes marinas y el comportamiento de la PT del 7 de junio del 2013.

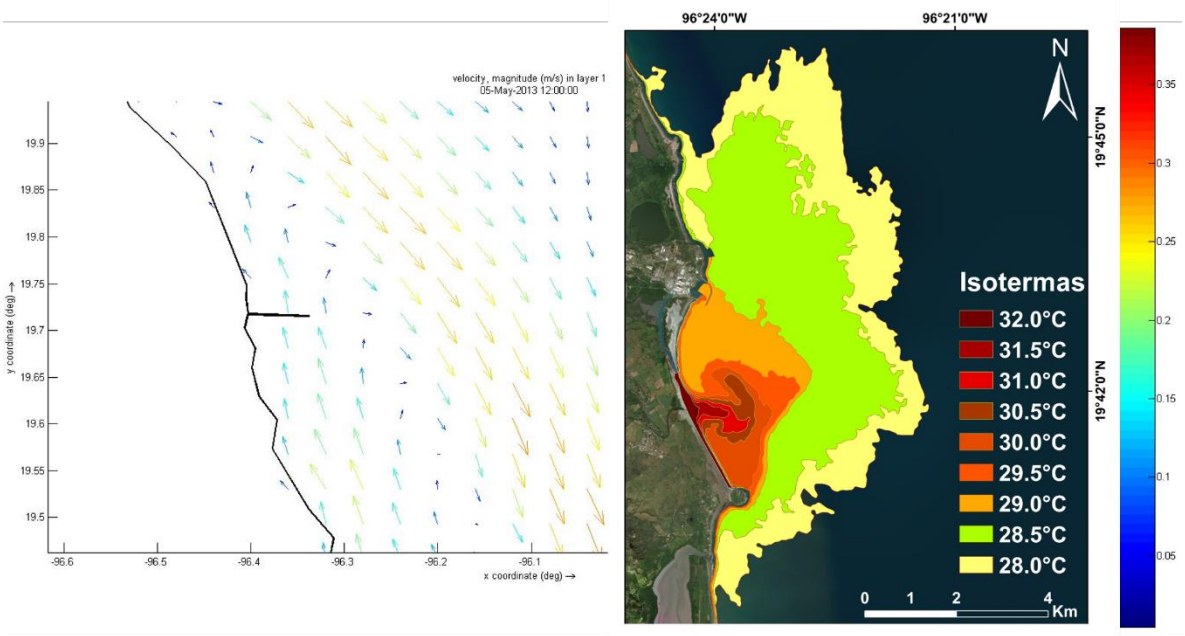


Figura 84. Relación existente entre las CM del 5 de mayo del 2013 y la PT del 22 de mayo del 2013.

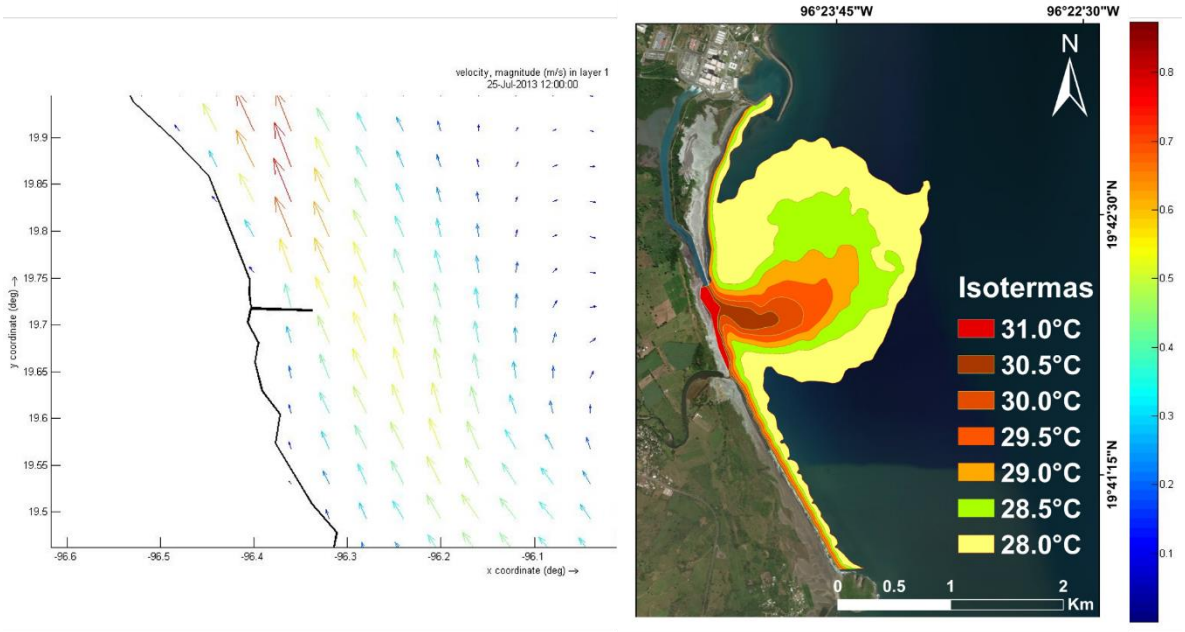


Figura 85. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 25 de julio del 2013.

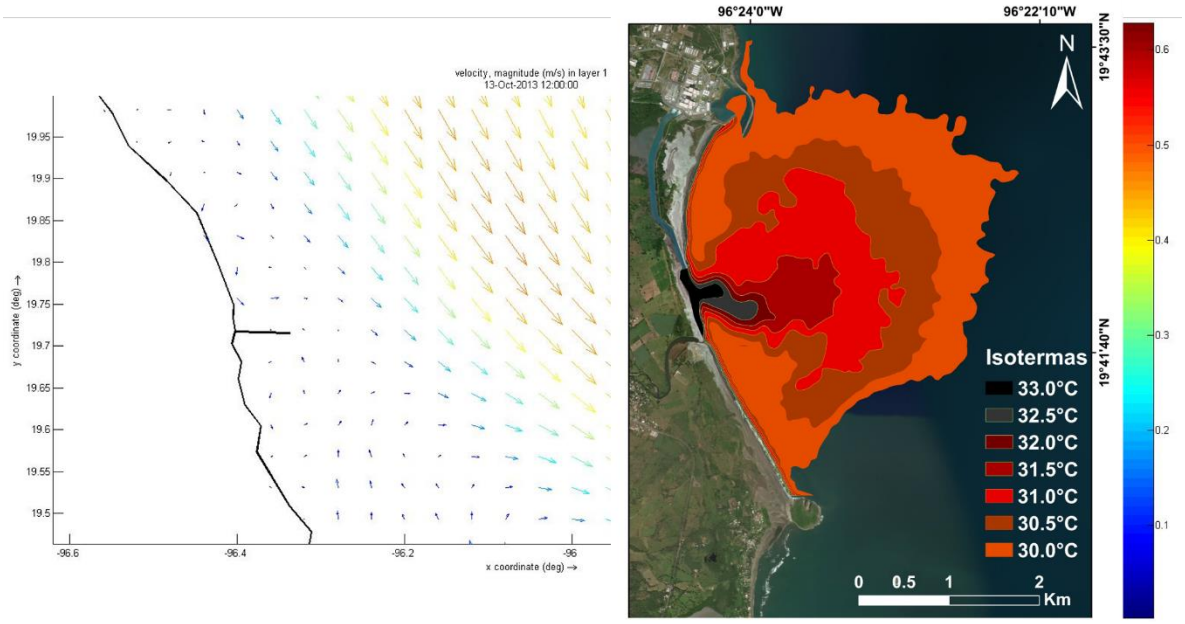


Figura 86. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 13 de octubre del 2013.

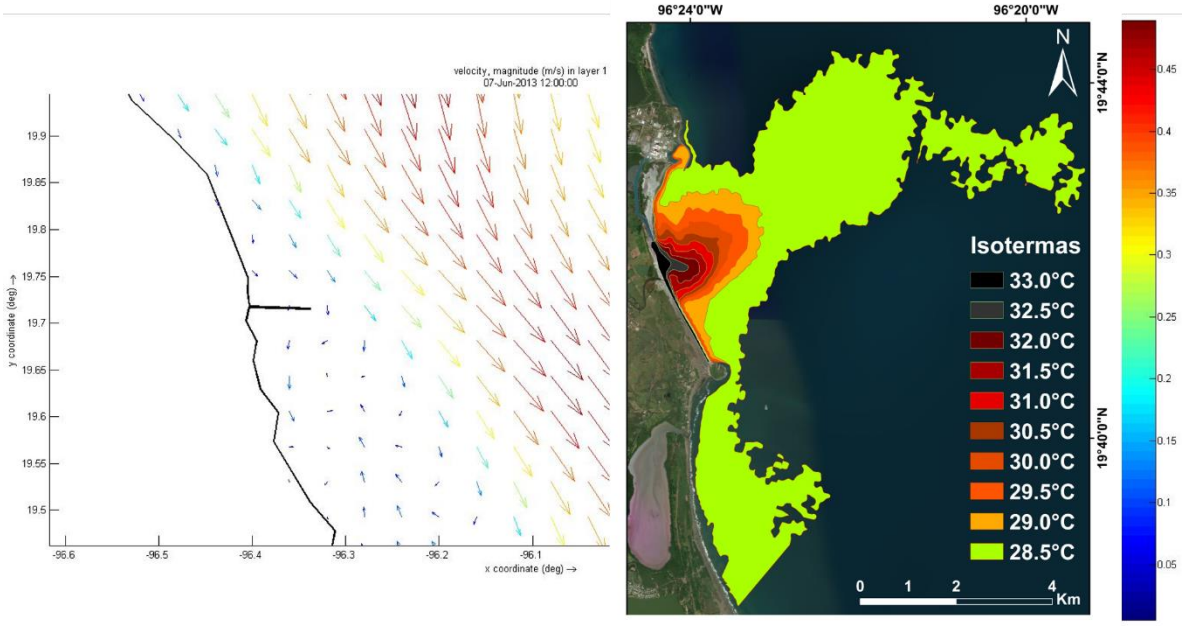


Figura 87. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 7 de junio del 2013.

Tabla 16. Relación entre la dirección de la dispersión de las PsTs y la dirección de las CM, Año 2013.

Año 2013					
Fecha	**Dirección (Plumas Térmicas)**	**Dirección (Grados)**	**Dirección (Corrientes Marinas)**	**Dirección (Grados)**	**Influencia**
22 de mayo	Noreste	155°	Norte	159°	Sí
7 de junio	Noreste	105°	Sureste	96°	No
25 de julio	Noreste	115°	Norte	127°	Sí
13 de octubre	Noreste	106°	Noreste	98°	Sí

Año 2014

En el año 2014, también se obtuvo una relación de influencia positiva entre las corrientes marinas y la dirección de la dispersión de las plumas térmicas. Pero en este caso, en el 100% de las imágenes , 2 de febrero (Figura 88), 18 de febrero (Figura 89), 22 de marzo (Figura 90), 23 de abril (Figura 91), 28 de julio (Figura 92), 13 de agosto (Figura 93), 29 de agosto (Figura 94), 3 de diciembre (Figura 95) y 19 de diciembre (Figura 96), se muestra la relación directa que existe entre estos dos factores como se muestra en la Tabla 17.

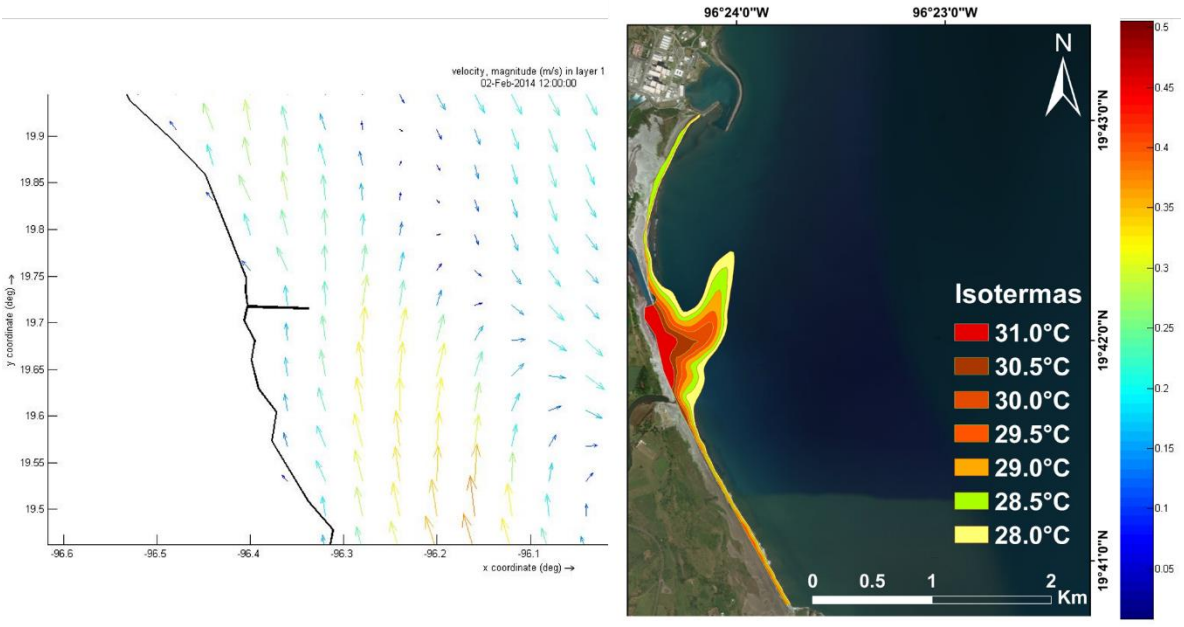


Figura 88. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 2 de febrero del 2014.

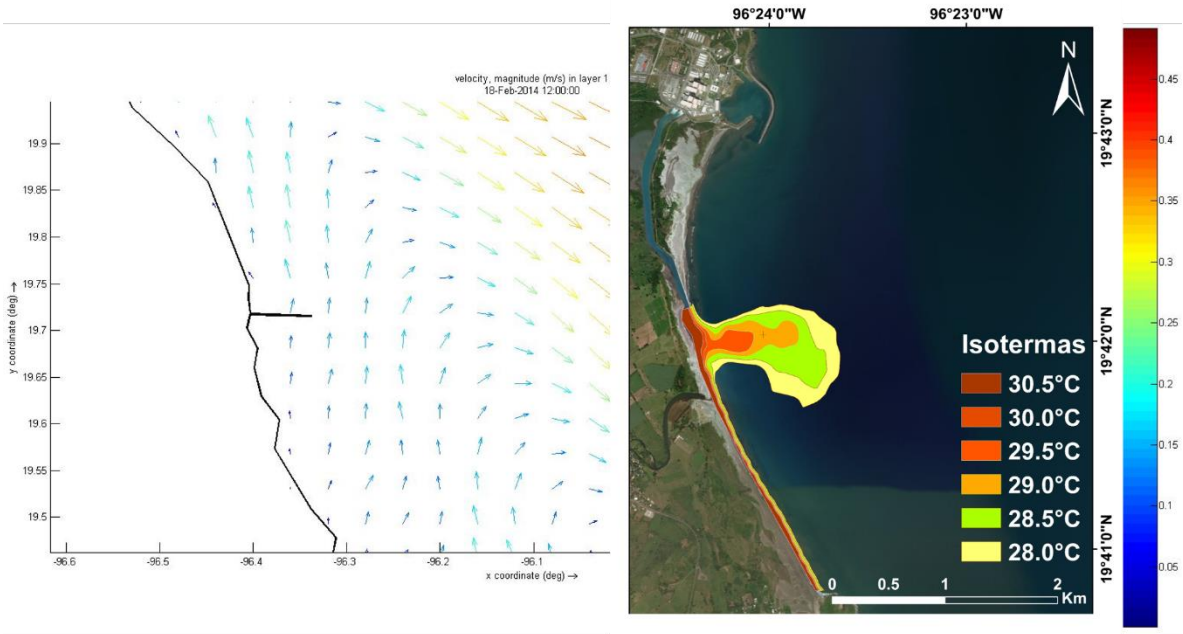


Figura 89. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 18 de febrero del 2014.

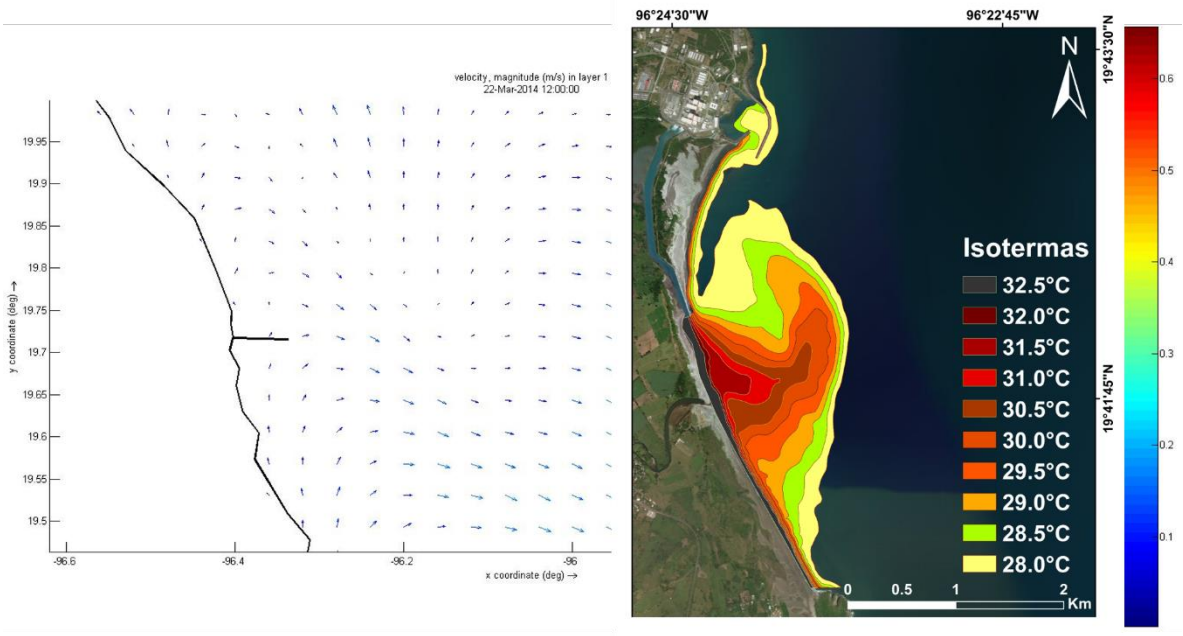


Figura 90. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 22 de marzo del 2014.

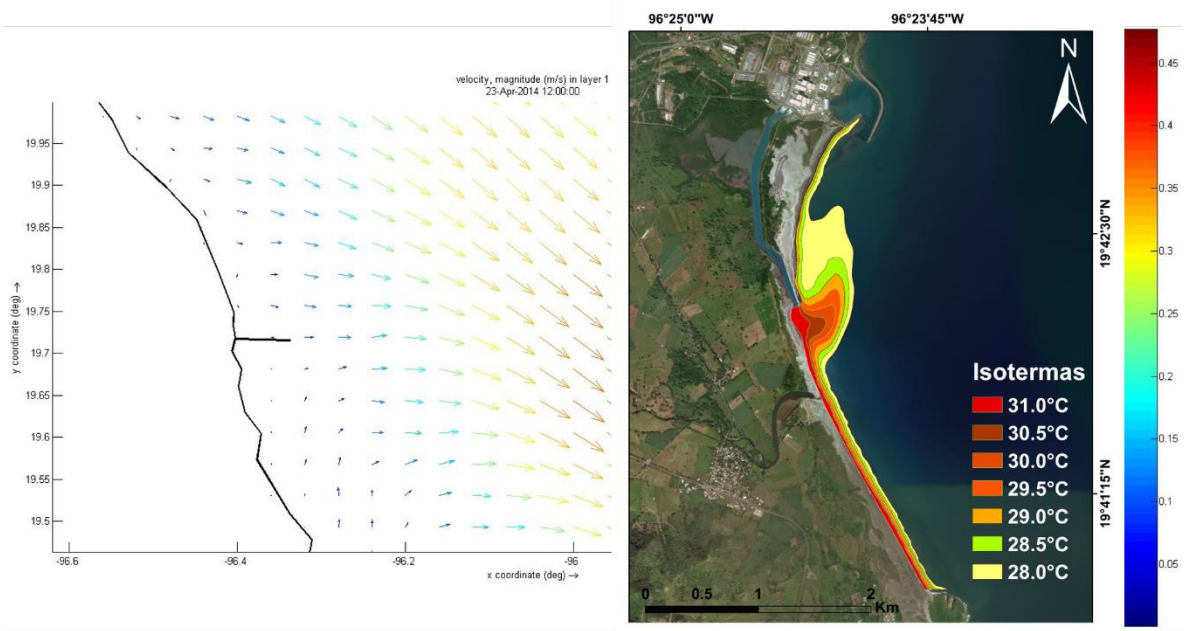


Figura 91. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 23 de abril del 2014.

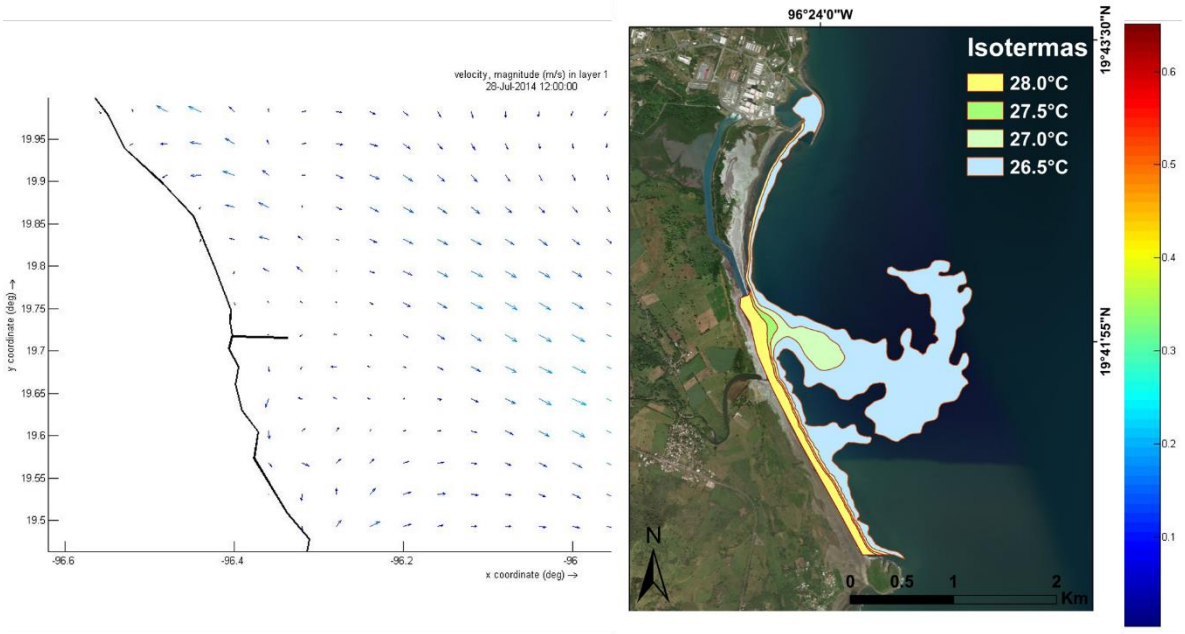


Figura 92. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 28 de julio del 2014.

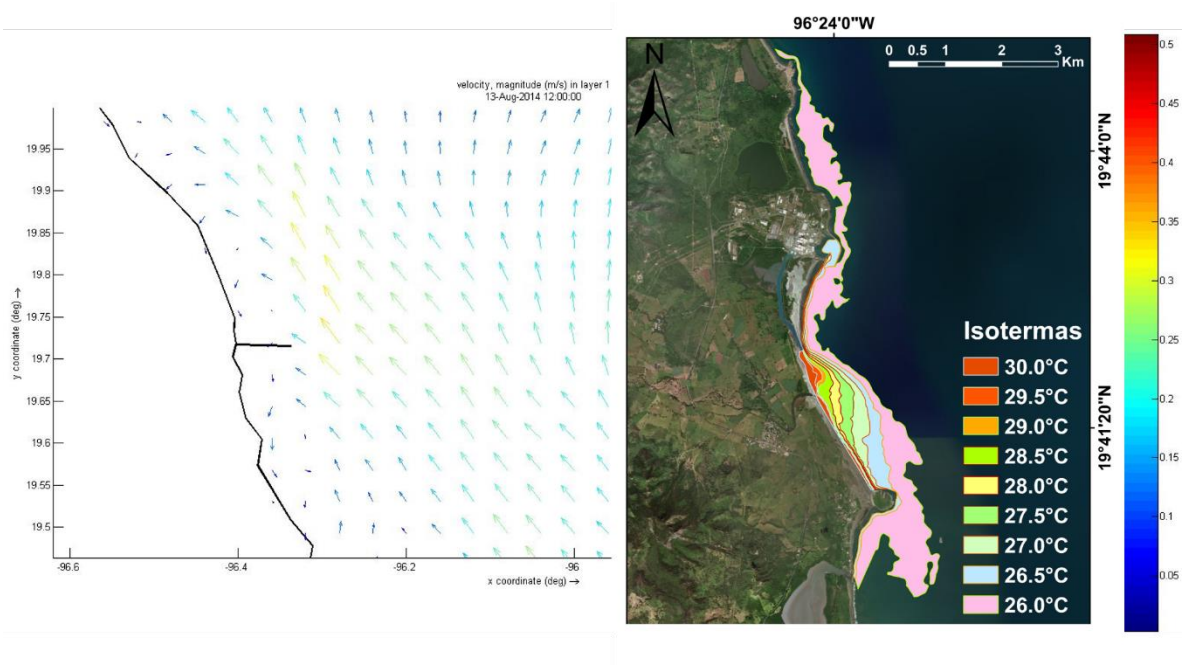


Figura 93. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 13 de agosto del 2014.

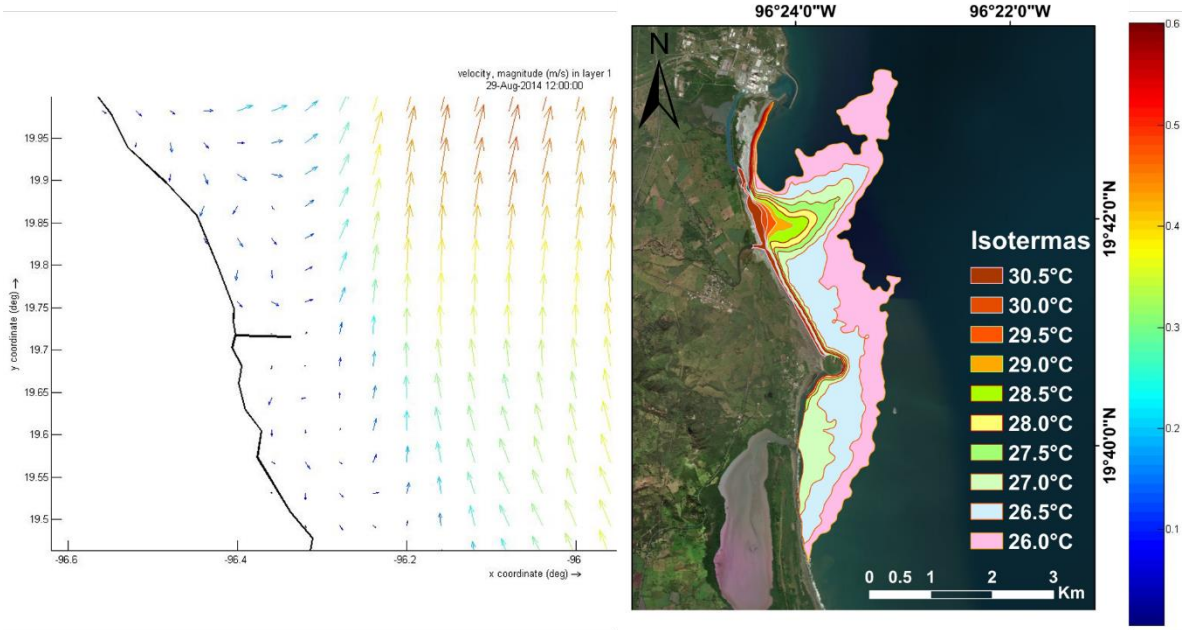


Figura 94. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 29 de agosto del 2014.

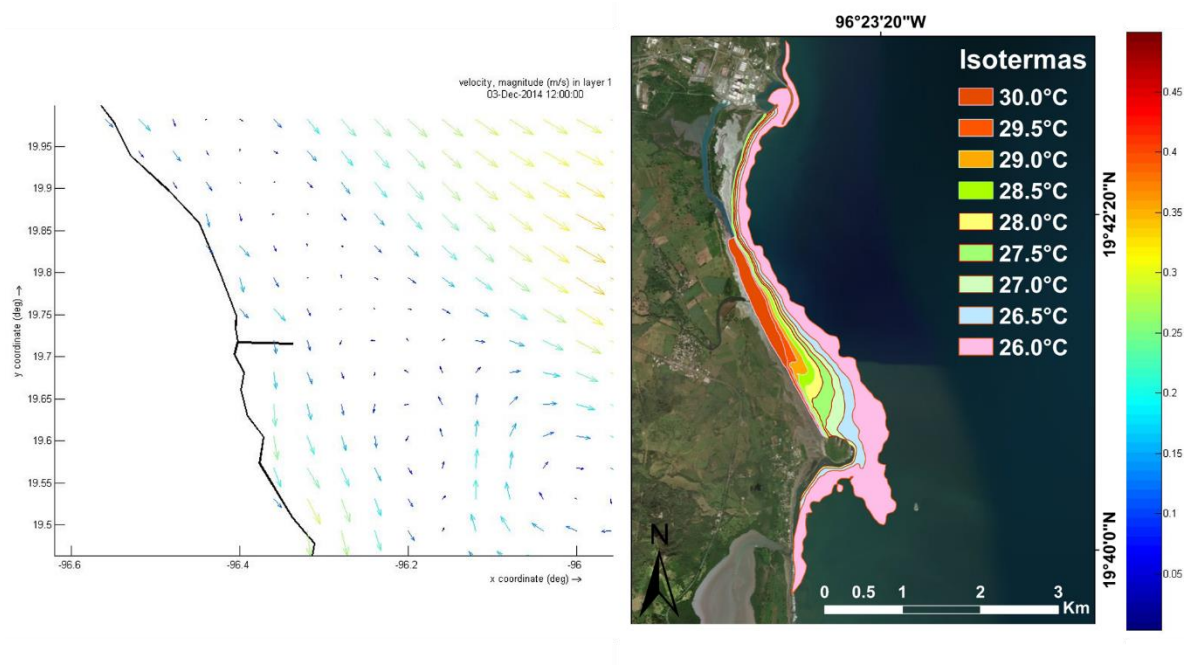


Figura 95. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 3 de diciembre del 2014.

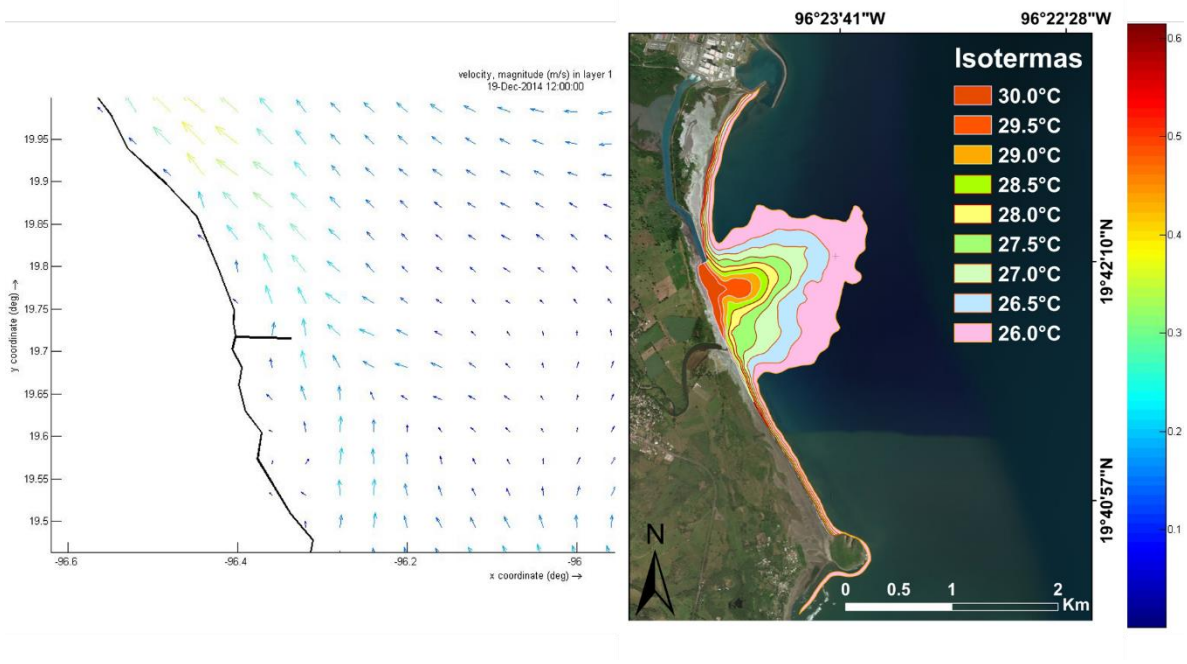


Figura 96. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 19 de diciembre del 2014.

Tabla 17. Relación entre la dirección de la dispersión de las PsTs y la dirección de las CM, Año 2014.

Año 2014					
Fecha	**Dirección (Plumas Térmicas)**	**Dirección (Grados)**	**Dirección (Corrientes Marinas)**	**Dirección (Grados)**	**Influencia**
2 de febrero	Noreste	124°C	Norte	110°C	Sí
18 de febrero	Este	66°C	Norte	54°C	Sí
22 de marzo	Noreste	164°C	Noreste	143°C	Sí
23 de abril	Noreste	157°C	Norte	136°C	Sí
28 de julio	Sureste	69°C	Sur	60°C	Sí
13 de agosto	Sureste	24°C	Sureste	30°C	Sí
29 de agosto	Noreste	132°C	Noreste	127°C	Sí
3 de diciembre	Sureste	28°C	Sureste	13°C	Sí
19 de diciembre	Noreste	103°C	Noreste	166°C	Sí

Año 2015

En el año 2015, se determinó una relación positiva existente entre la dirección de la dispersión de las plumas térmicas y la dirección de las corrientes marinas, en cinco (29 de junio (Figura 97), 15 de julio (Figura 98), 17 de septiembre (Figura 99), 3 de octubre (Figura 100) y 6 de diciembre (Figura 101)) de las siete imágenes existentes (31 de julio (Figura 102) y 4 de noviembre (Figura 103)), lo que representa el 72% del total en ese año. Los resultados comparativos obtenidos se muestran en la Tabla 18.

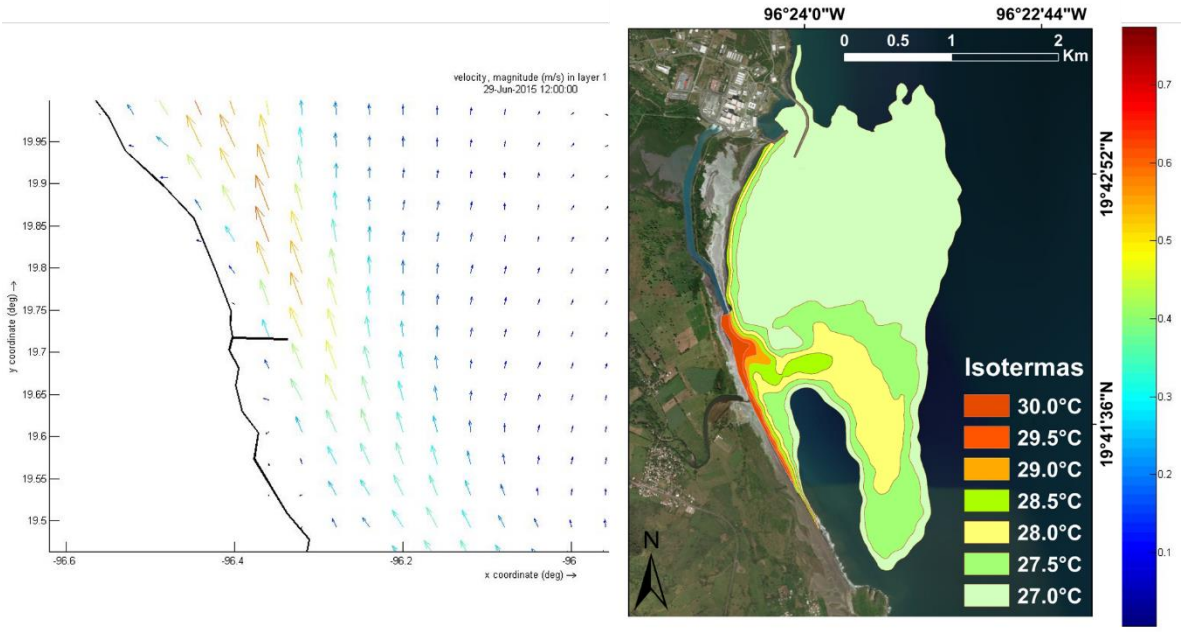


Figura 97. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 29 de junio del 2015.

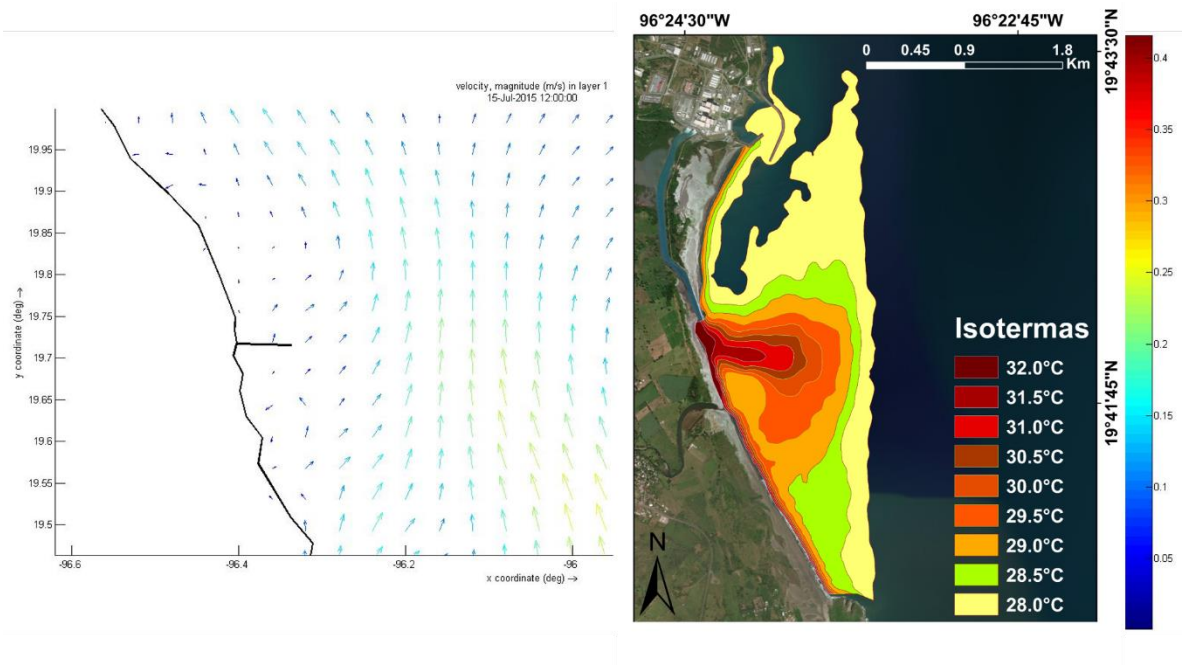


Figura 98. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 15 de julio del 2015.

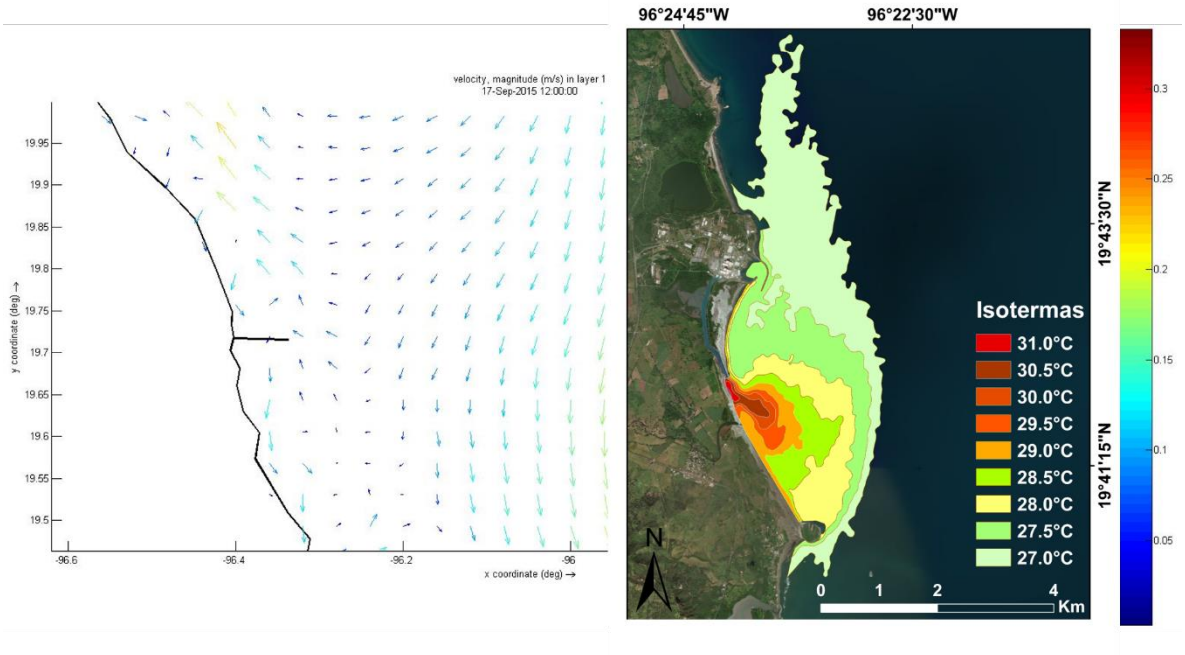


Figura 99. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 17 de septiembre del 2015.

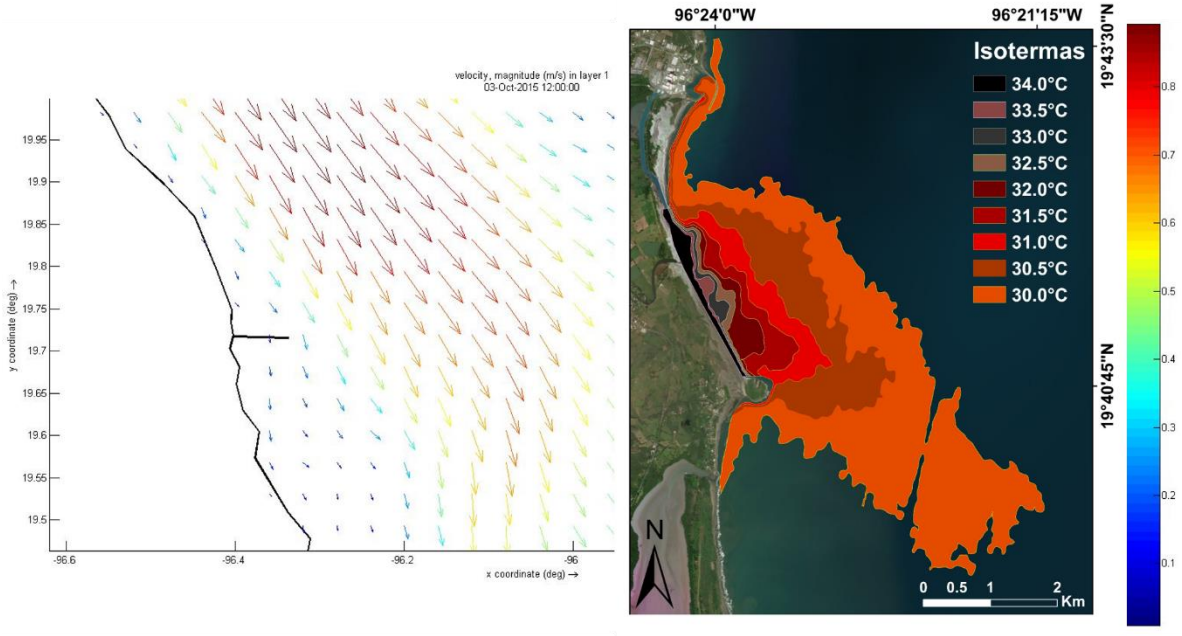


Figura 100. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 3 de octubre del 2015.

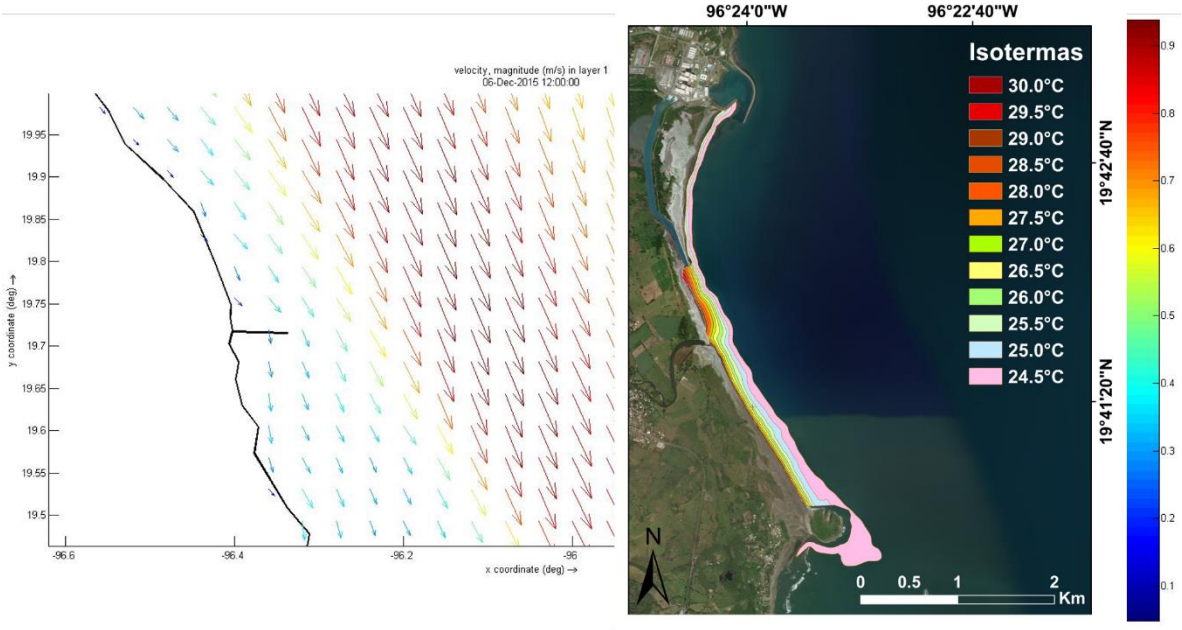


Figura 101. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 6 de diciembre del 2015.

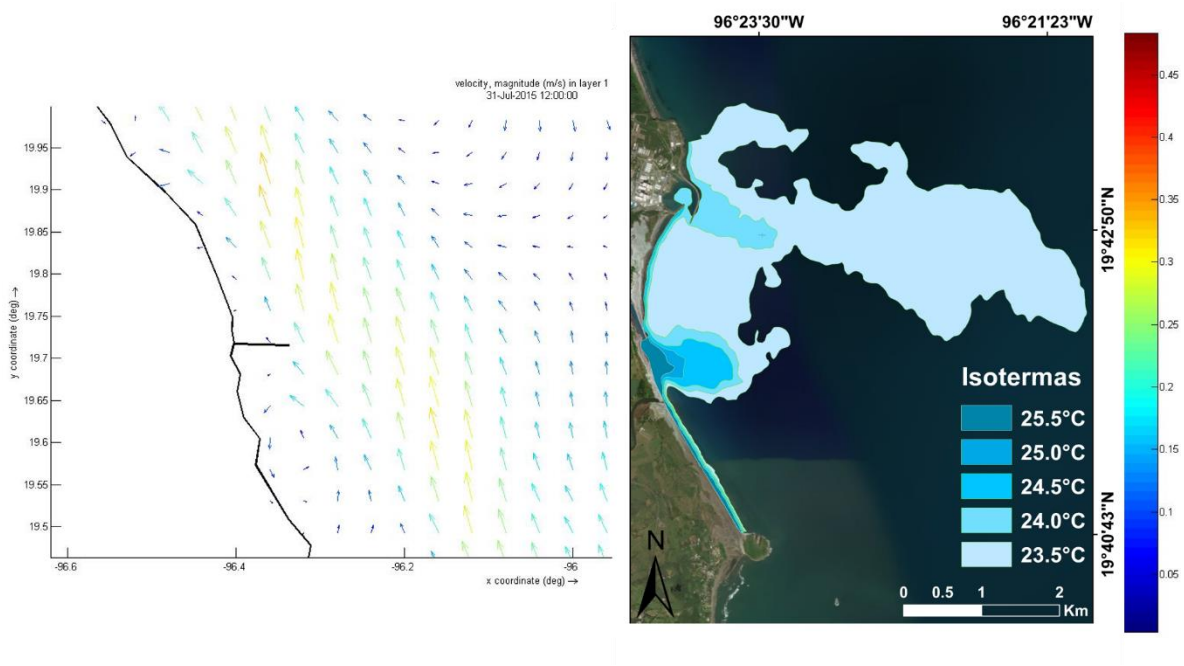


Figura 102. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 31 de julio del 2015.

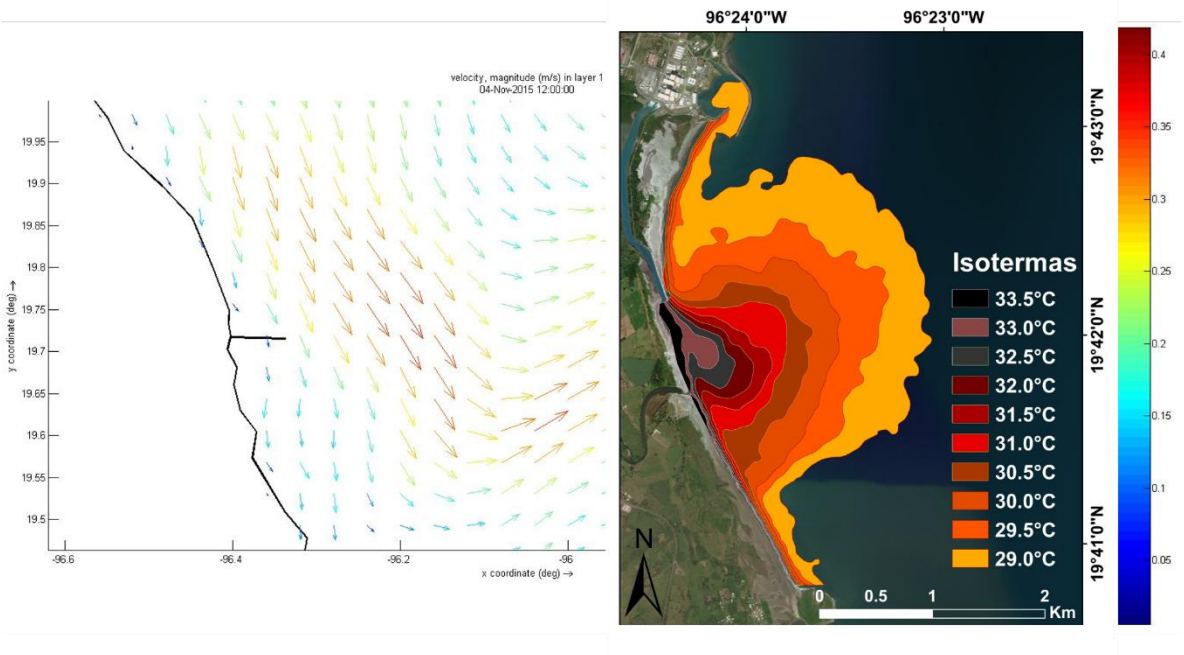


Figura 103. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 4 de noviembre del 2015.

Tabla 18. Relación entre la dirección de la dispersión de las PsTs y la dirección de las CM, Año 2015.

Año 2015					
Fecha	**Dirección (Plumas Térmicas)**	**Dirección (Grados)**	**Dirección (Corrientes Marinas)**	**Dirección (Grados)**	**Influencia**
29 de junio	Este	32°C	Norte	20°C	Sí
15 de julio	Este	149°C	Norte	166°C	Sí
31 de julio	Este	93°C	Norte	115°C	No
17 de septiembre	Norte	169°C	Norte	150°C	Sí
3 de octubre	Sureste	51°C	Sureste	37°C	Sí
4 de noviembre	Noreste	82°C	Sureste	68°C	No
6 de diciembre	Sureste	33°C	Sureste	26°C	Sí

Año 2016

En el año 2016, del total de las imágenes que se obtuvieron del satélite Landsat-8 (17 imágenes), el 83% de las imágenes, 14 imágenes (7 de enero (Figura 104), 23 de enero (Figura 105), 27 de marzo (Figura 106), 12 de abril (Figura 107), 14 de mayo (Figura 108), 30 de mayo (Figura 109), 1 de julio (Figura 110), 17 de julio (Figura 111), 18 de agosto (Figura 112), 19 de septiembre (Figura 113), 5 de octubre (Figura 114), 21 de octubre (Figura 115), 6 de noviembre (Figura 116) y 8 de diciembre (Figura 117)), presentan una relación favorable entre la dirección de dispersión de las plumas térmicas y la dirección de las corrientes marinas obtenidas de la simulación HYCOM; mientras que en las plumas térmicas obtenidas del 28 de abril (Figura 118), 22 de noviembre (Figura 119) y 24 de diciembre (Figura 120) la relación existente fue desfavorable. En la Tabla 19 se muestran los resultados comparativos obtenidos.

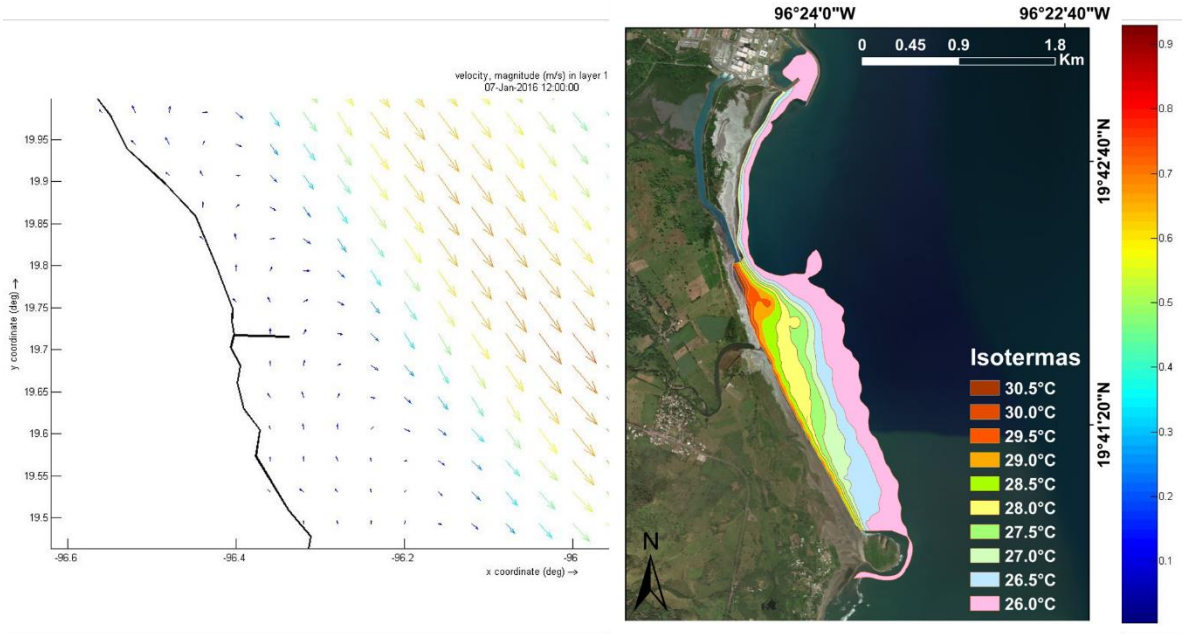


Figura 104. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 7 de enero del 2016.

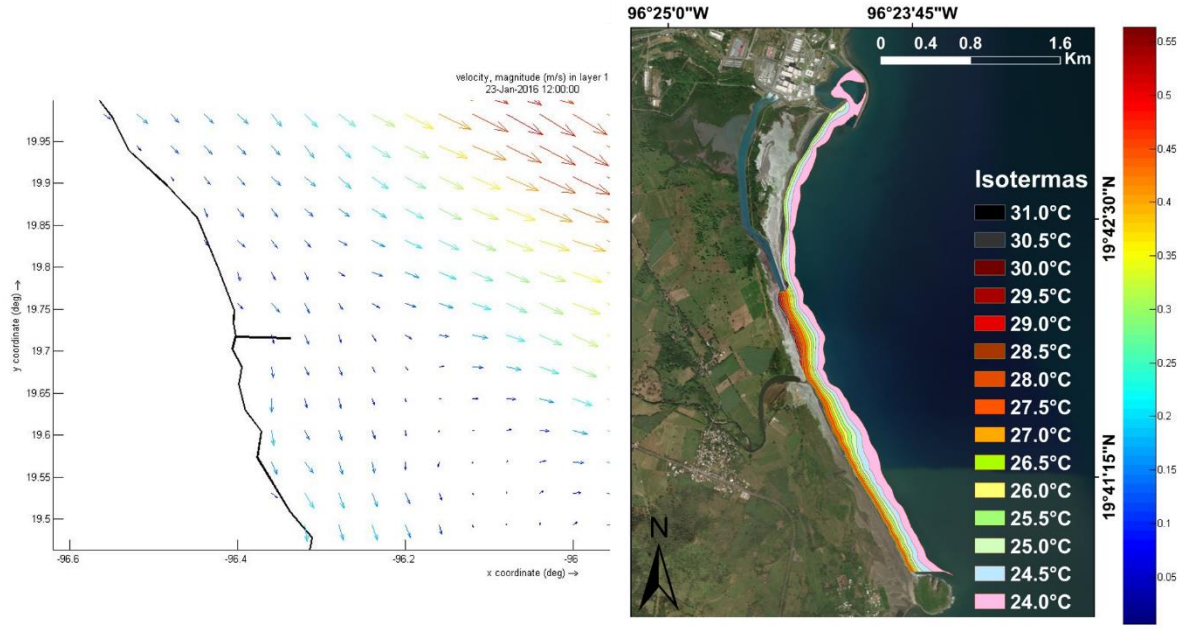


Figura 105. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 23 de enero del 2016.

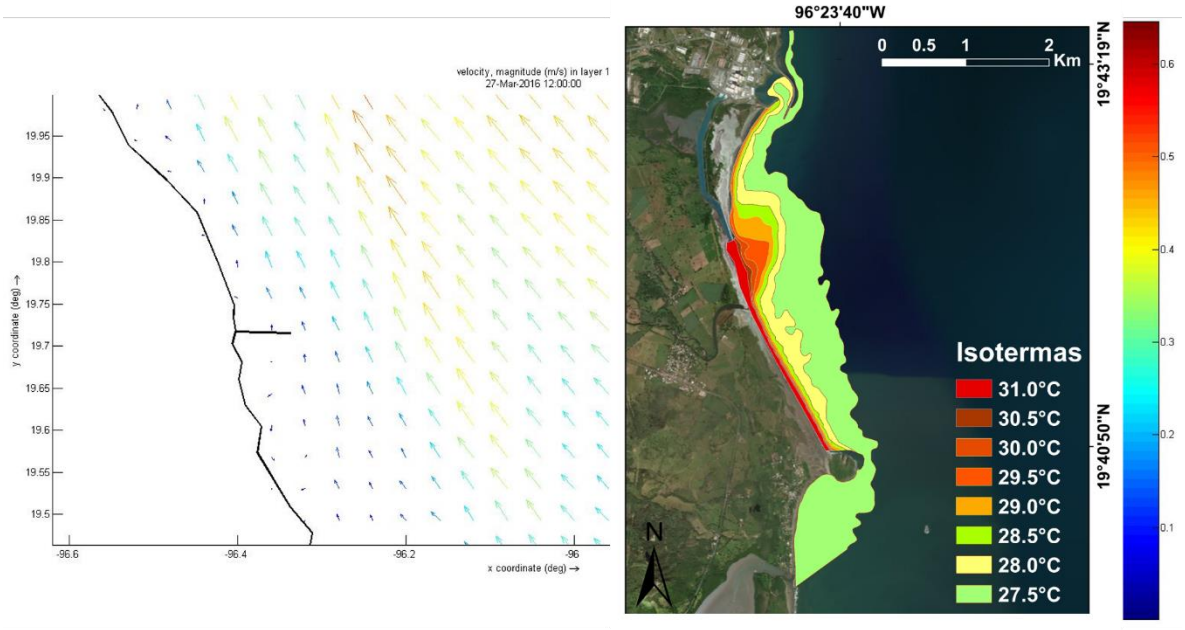


Figura 106. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 27 de marzo del 2016.

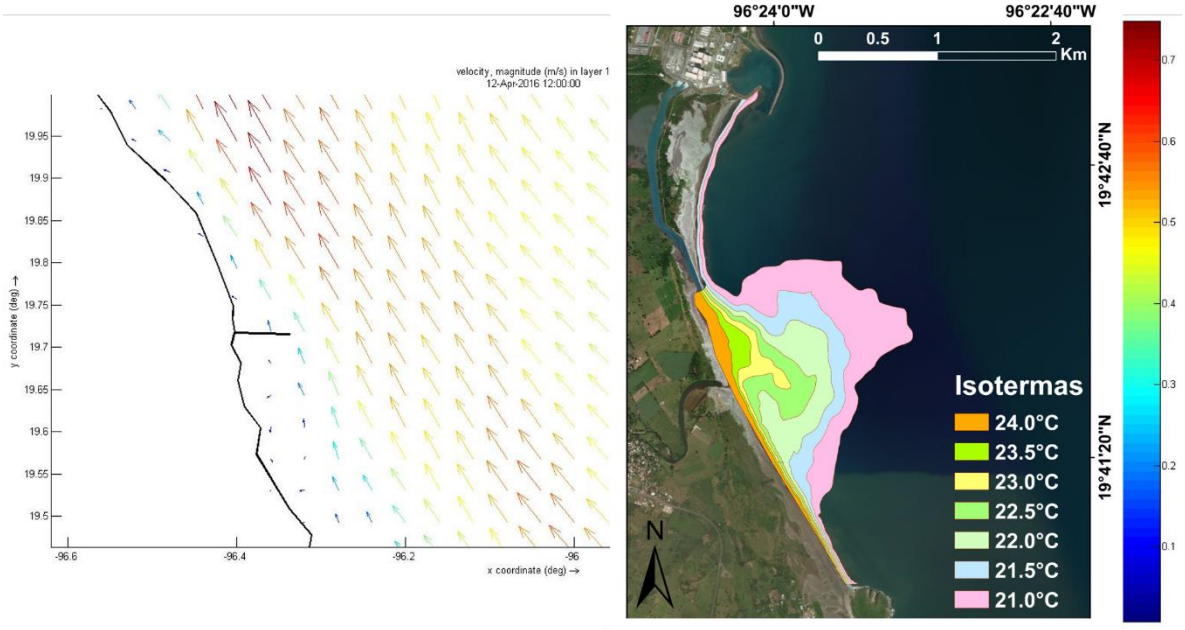


Figura 107. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 12 de abril del 2016.

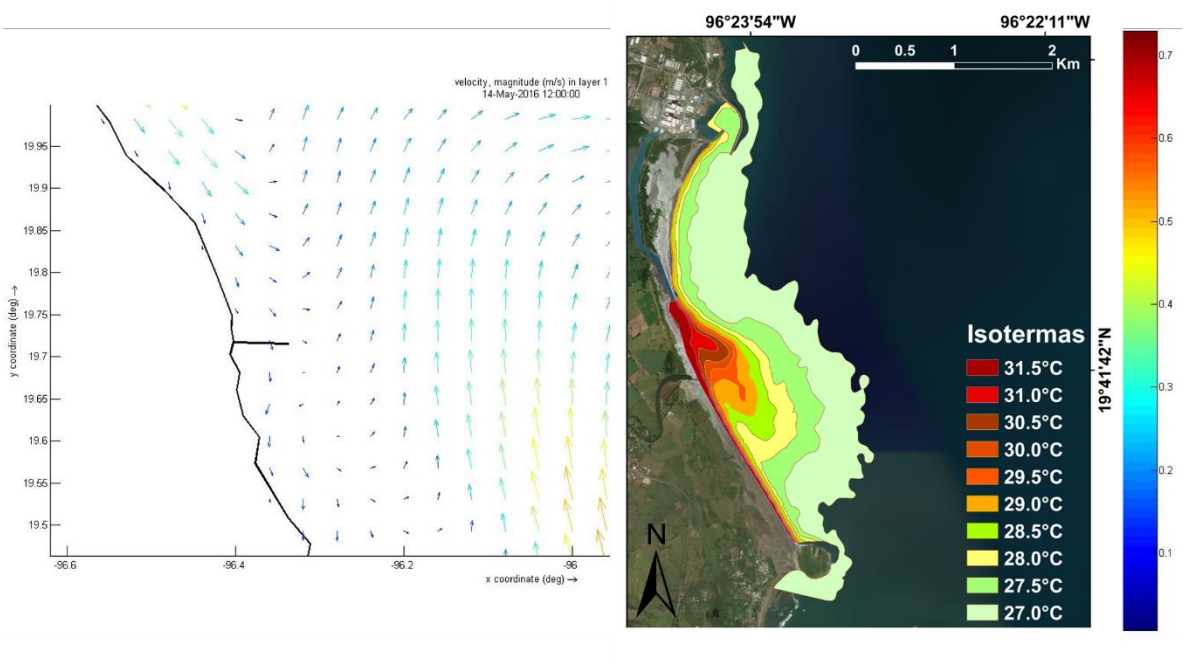


Figura 108. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 14 de mayo del 2016

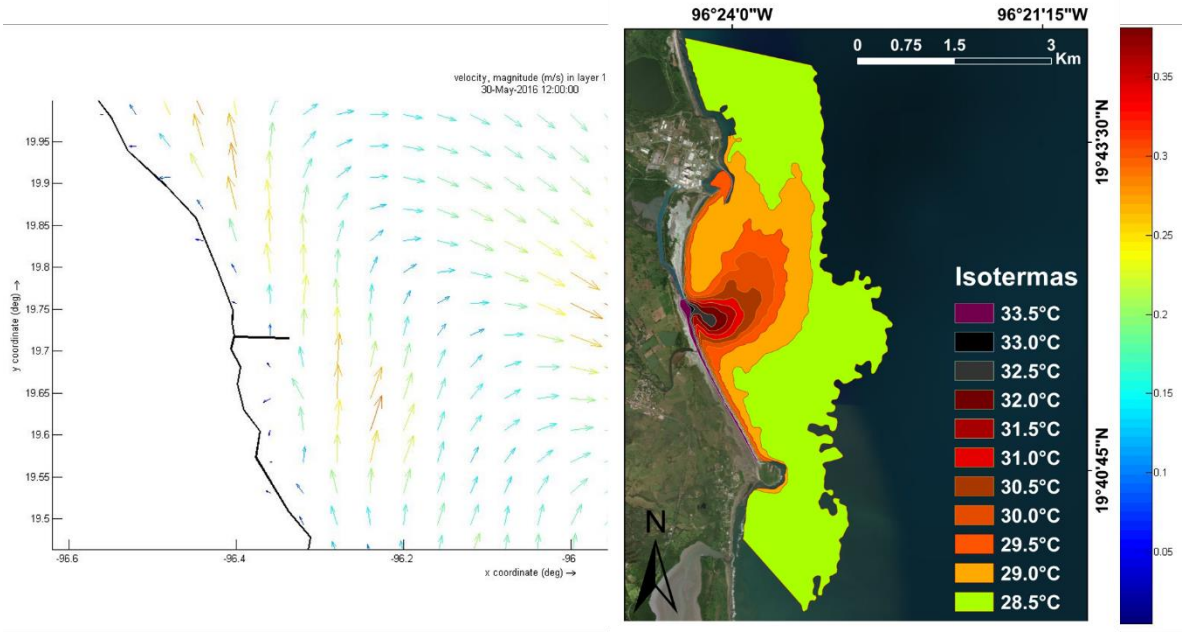


Figura 109. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 30 de mayo del 2016.

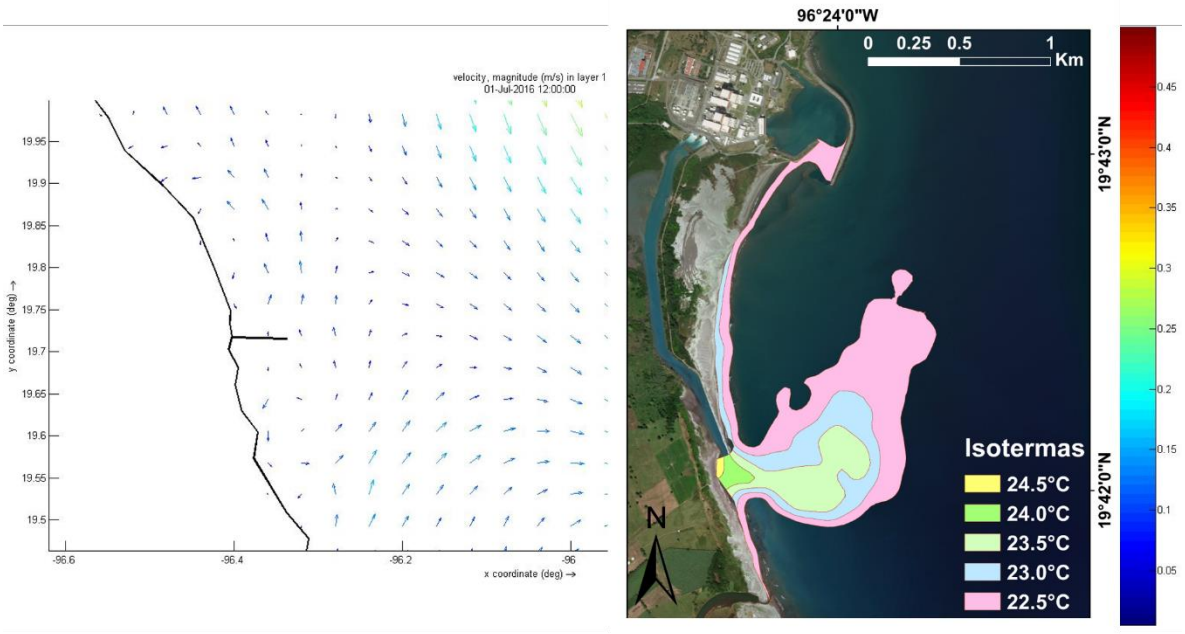


Figura 110. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 1 de julio del 2016.

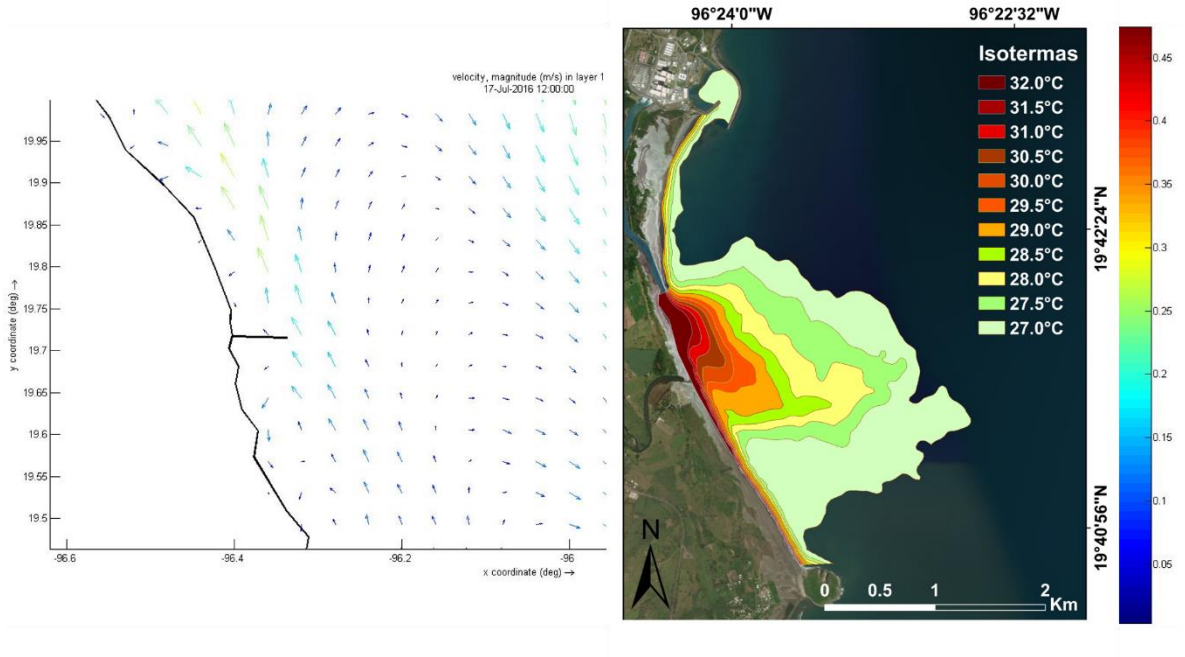


Figura 111. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 17 de julio del 2016.

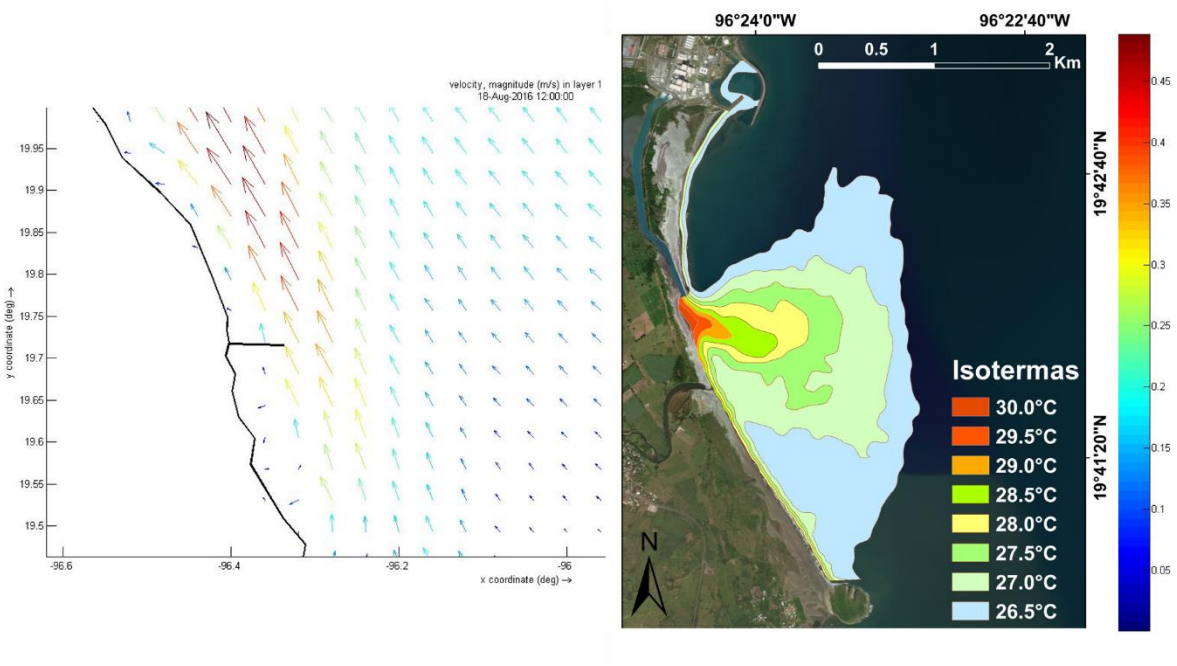


Figura 112. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 18 de agosto del 2016.

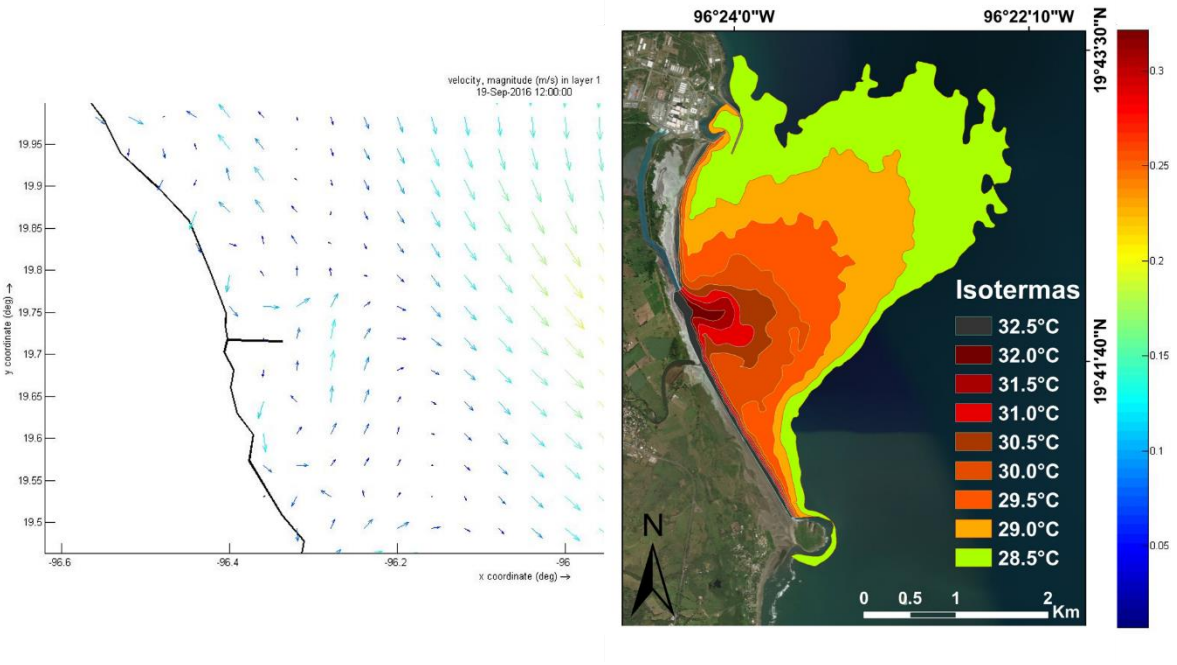


Figura 113. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 19 de septiembre del 2016.

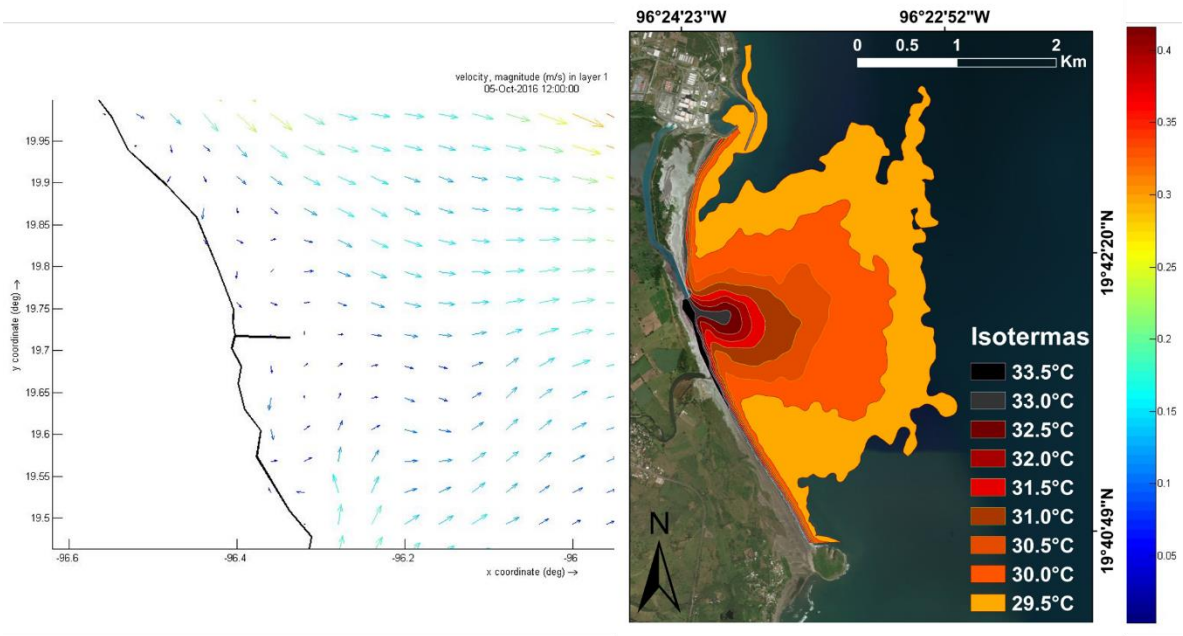


Figura 114. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 5 de octubre del 2016.

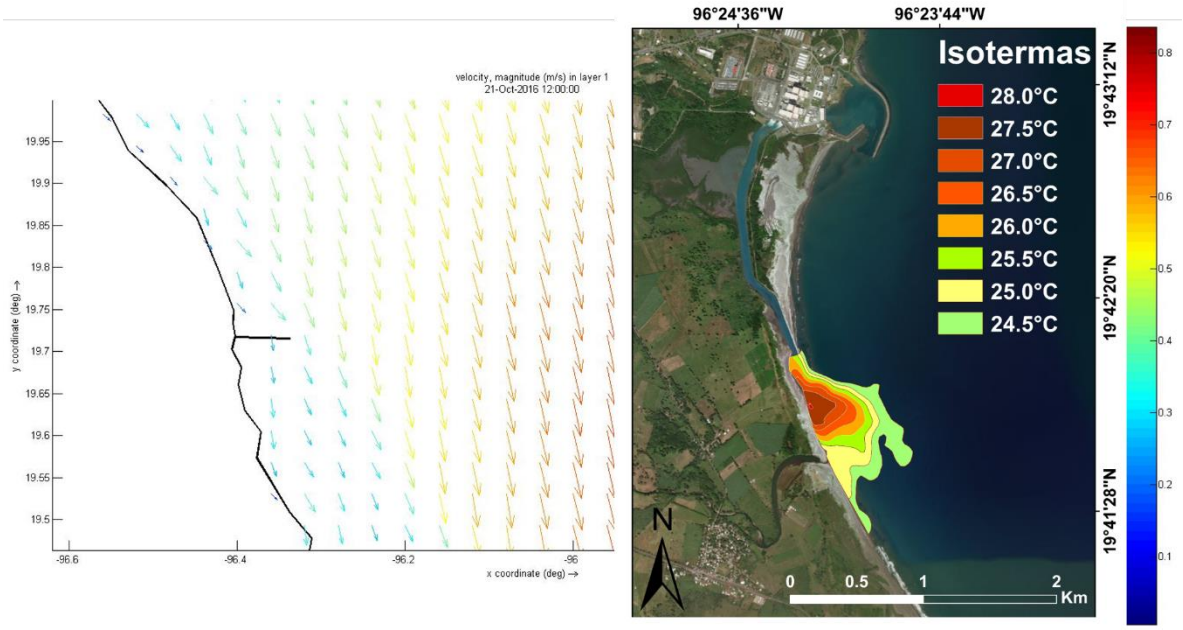


Figura 115. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 21 de octubre del 2016.

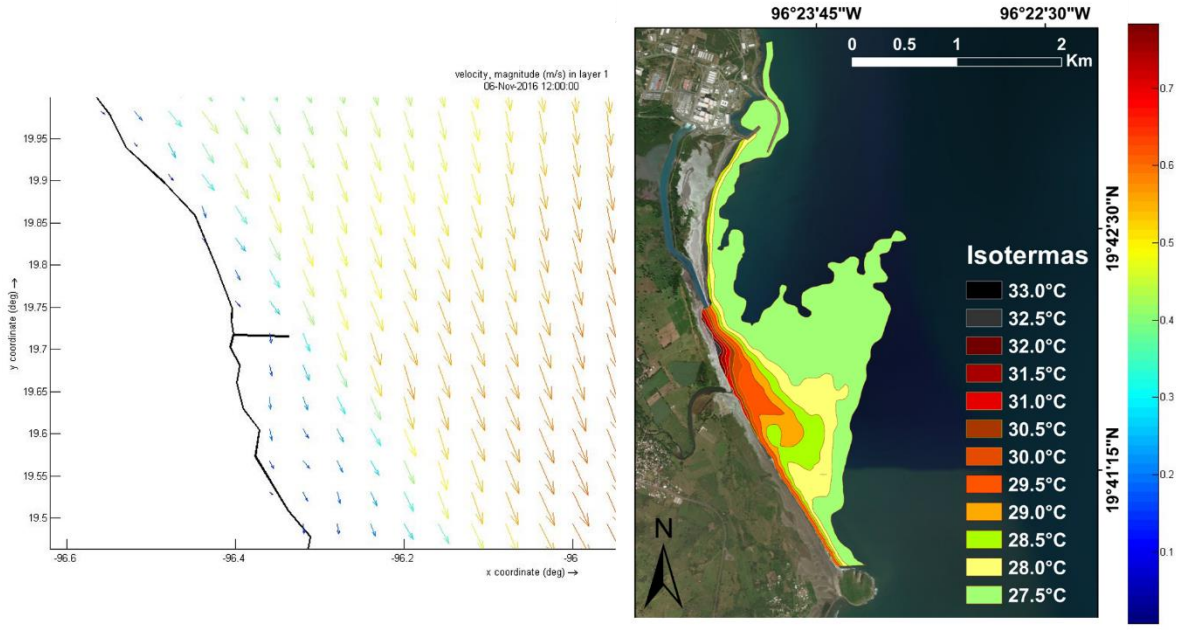


Figura 116. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 6 de noviembre del 2016.

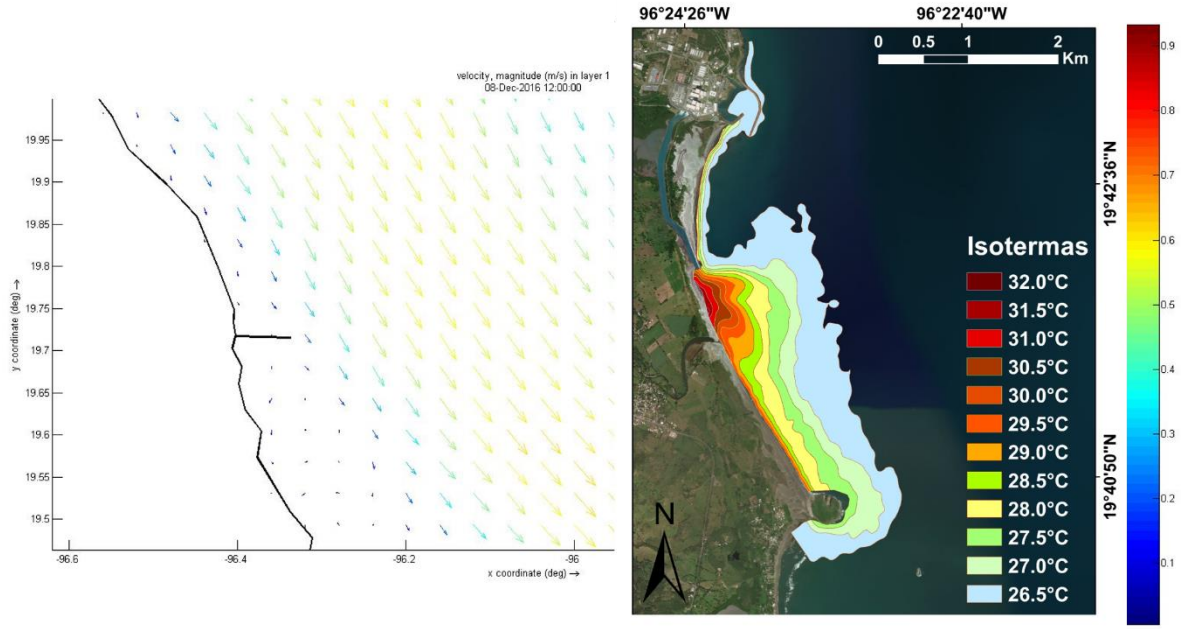


Figura 117. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 8 de diciembre del 2016.

Tabla 19. Relación entre la dirección de la dispersión de las PsTs y la dirección de las CM, Año 2016.

Año 2016					
Fecha	**Dirección (Plumas Térmicas)**	**Dirección (Grados)**	**Dirección (Corrientes Marinas)**	**Dirección (Grados)**	**Influencia**
7 de enero	Sureste	32°C	Noreste	31°C	Sí
23 de enero	Sureste	29°C	Sureste	20°C	Sí
27 de marzo	Noreste	97°C	Norte	125°C	Sí
12 de abril	Este	78°C	Norte	40°C	Sí
28 de abril	Sureste	42°C	Norte	22°C	No
14 de mayo	Sureste	43°C	Sureste	20°C	Sí
30 de mayo	Noreste	150°C	Norte	156°C	Sí
1 de julio	Este	135°C	Norte	136°C	Sí
17 de julio	Sureste	68°C	Norte	40°C	Sí
18 de agosto	Este	64°C	Norte	72°C	Sí
19 de septiembre	Noreste	122°C	Noreste	124°C	Sí
5 de octubre	Este	132°C	Este	131°C	Sí
21 de octubre	Este	47°C	Sureste	41°C	Sí
6 de noviembre	Sureste	34°C	Sureste	15°C	Sí
22 de noviembre	Este	106°C	Sureste	131°C	No
8 de diciembre	Sureste	122°C	Sureste	119°C	Sí
24 de diciembre	Este	101°C	Sureste	108°C	No

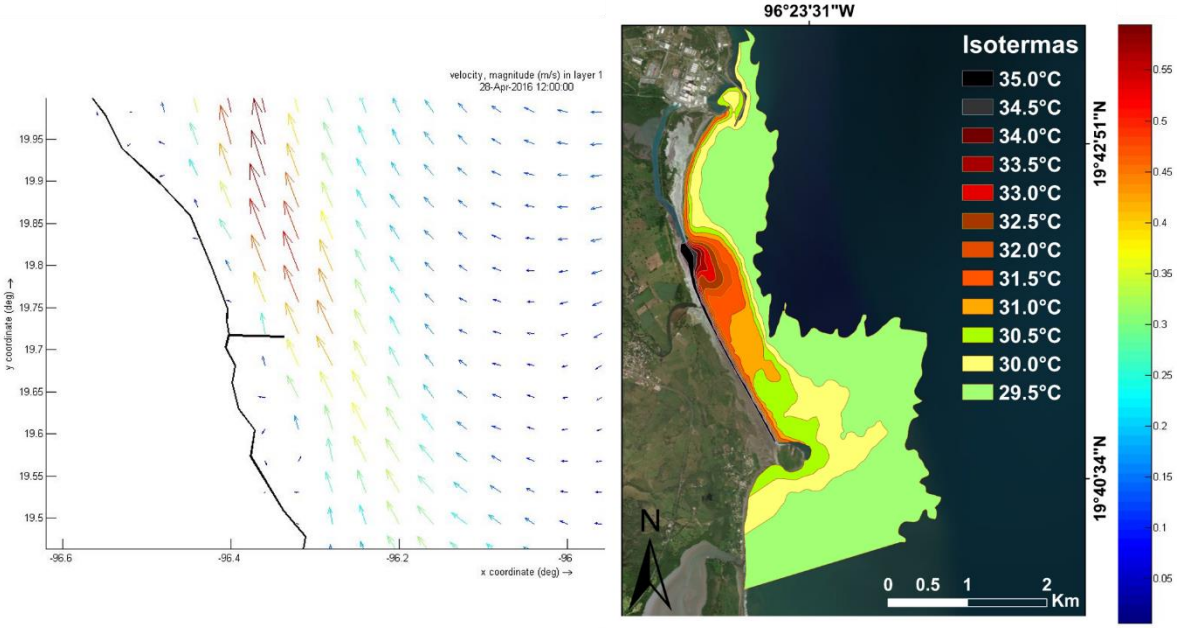


Figura 118. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 28 de abril del 2016.

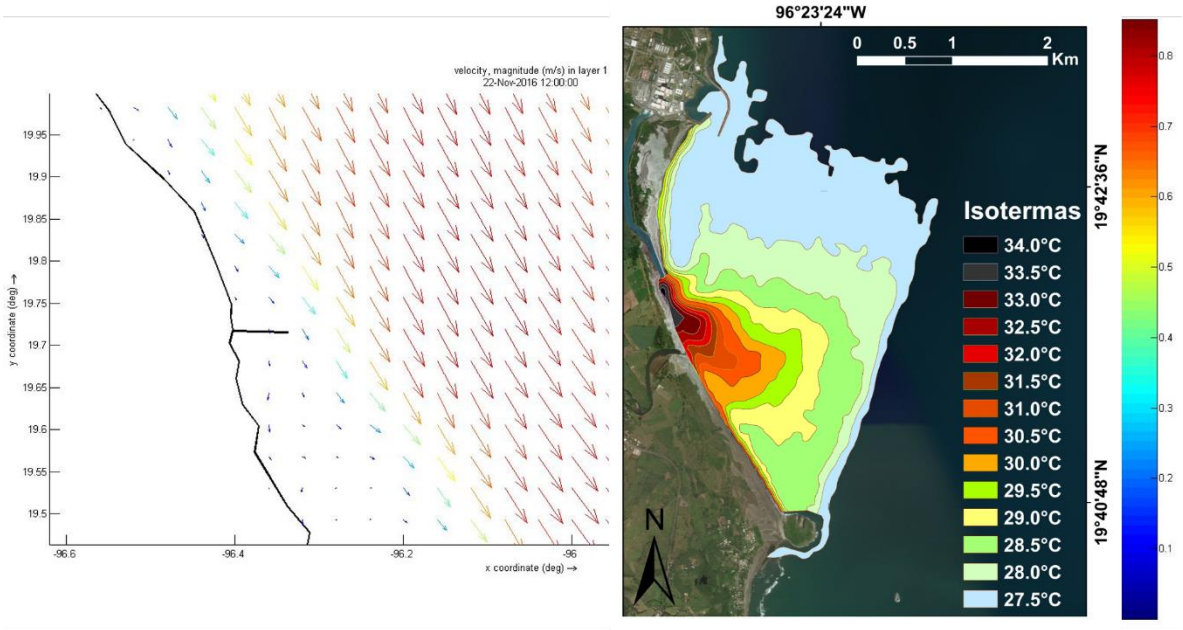


Figura 119. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 22 de noviembre del 2016.

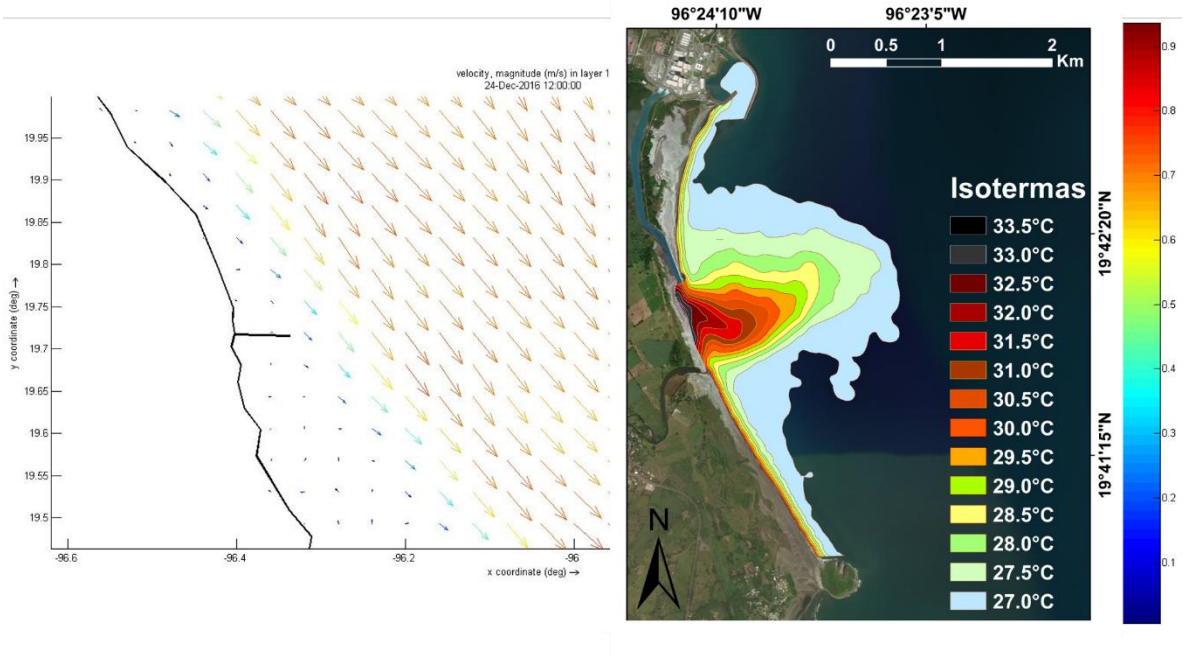


Figura 120. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 24 de diciembre del 2016.

Año 2017

En el año 2017 se obtuvo un nivel de influencia positivo en ocho de los nueve pares de imágenes comparados y analizados (25 de enero (Figura 121), 26 de febrero (Figura 122), 30 de marzo (Figura 123), 15 de abril (Figura 124), 1 de mayo (Figura 125), 17 de mayo (Figura 126), 18 de junio (Figura 127) y 8 de octubre (Figura 128)), lo que representa un 89%. Solo el par de imágenes con fechas del 4 de julio (Figura 129), tanto en la imagen de la pluma térmica como en la imagen de los vectores de las corrientes marinas obtenidas del HYCOM, se obtuvo un nivel de influencia negativo, es decir, que las corrientes marinas no están influyendo en la dirección de la dispersión de la pluma térmica. En la Tabla 20, se muestra un resumen del análisis comparativo realizado.

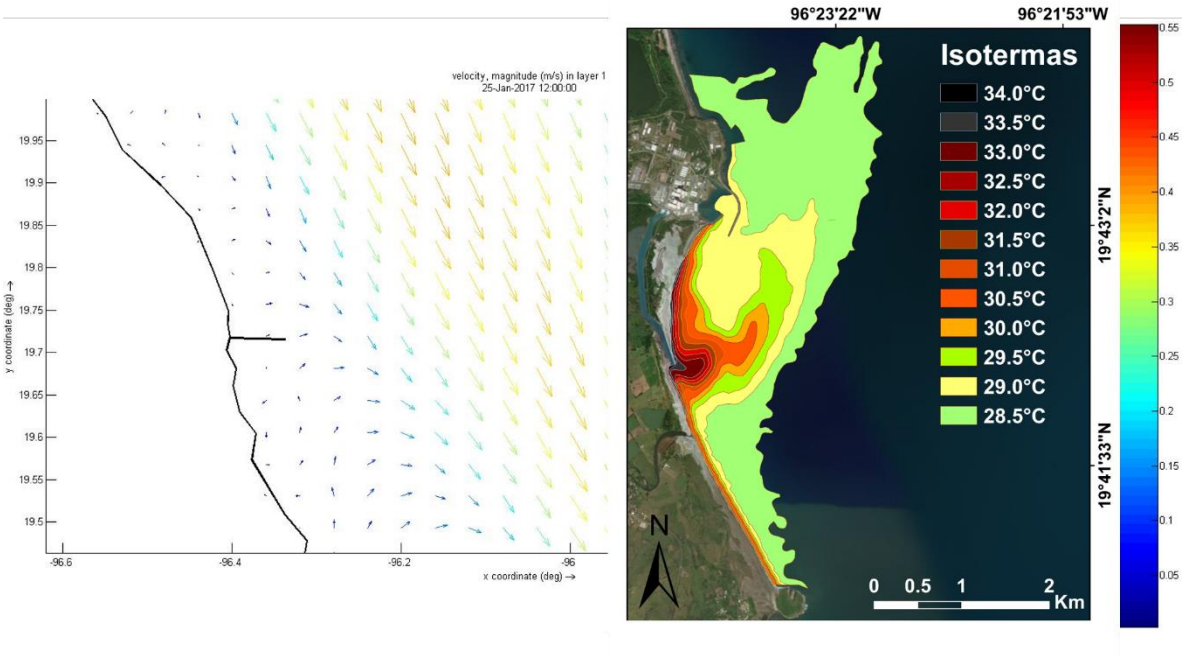


Figura 121. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 25 de enero del 2017.

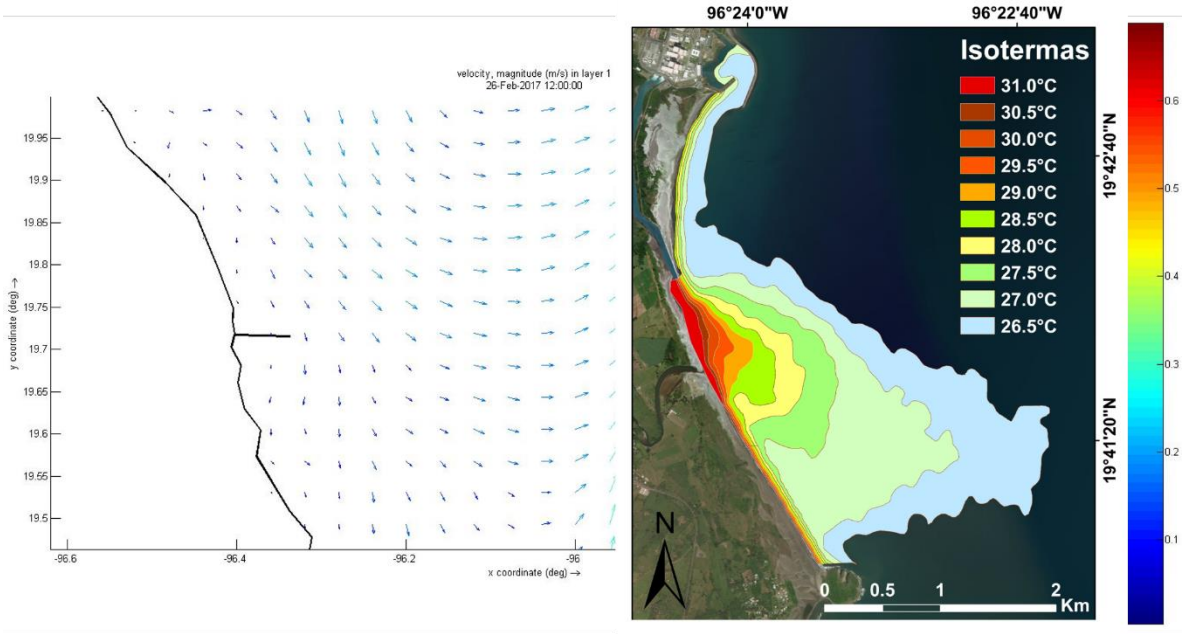


Figura 122. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 26 de febrero del 2017.

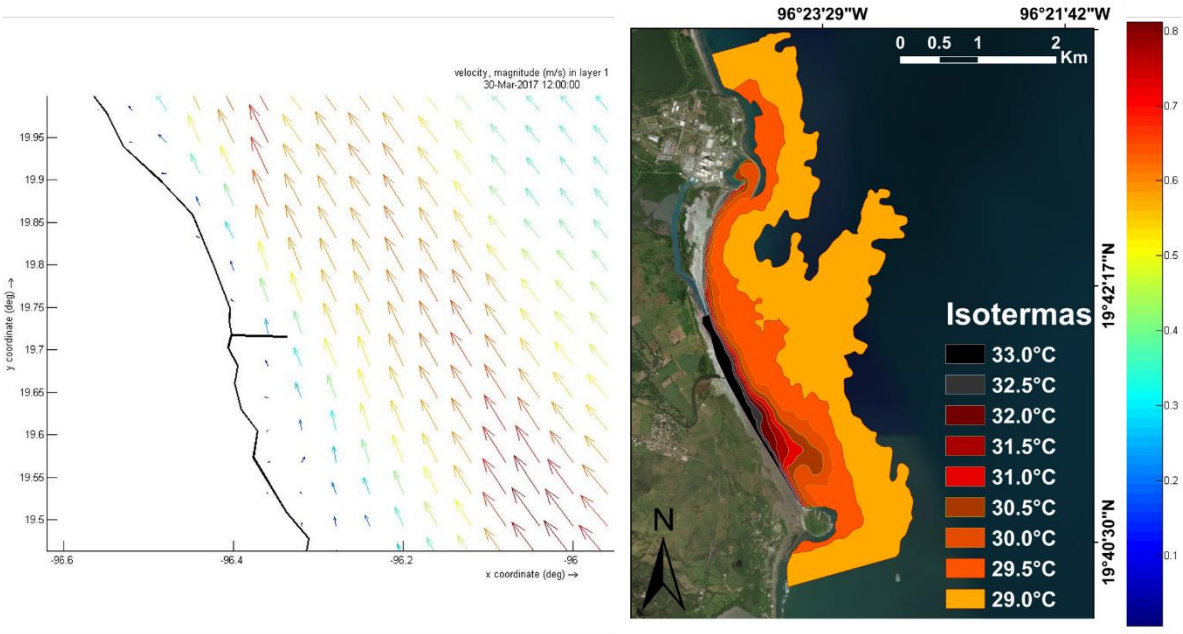


Figura 123. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 30 de marzo del 2017.

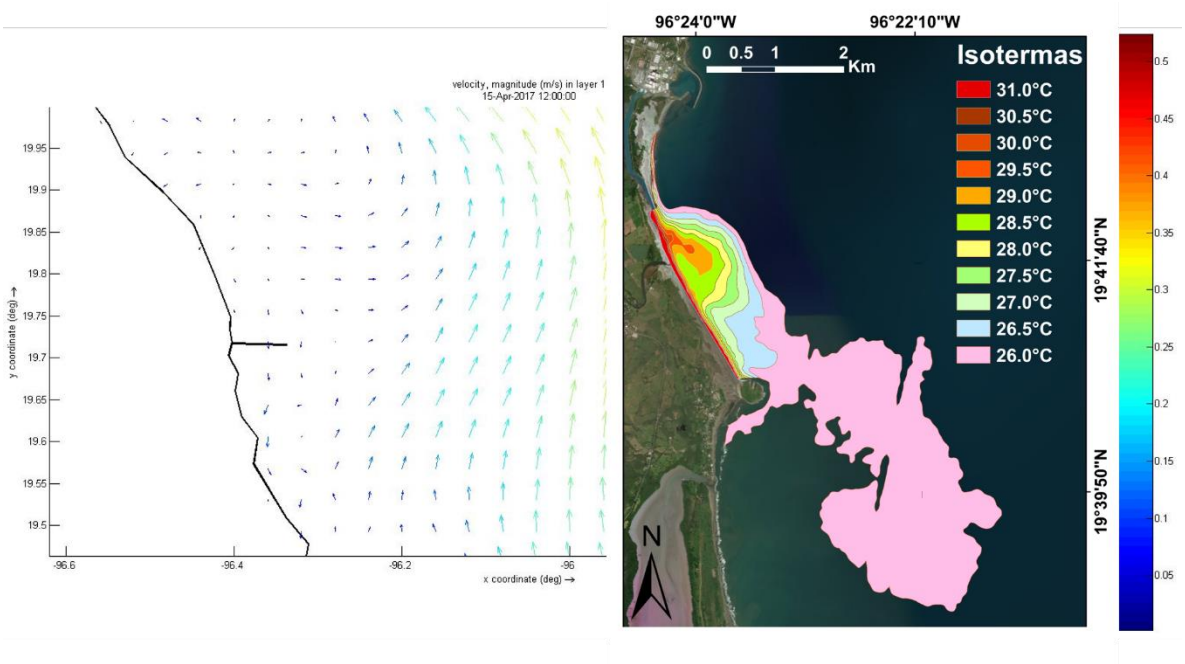


Figura 124. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 15 de abril del 2017.

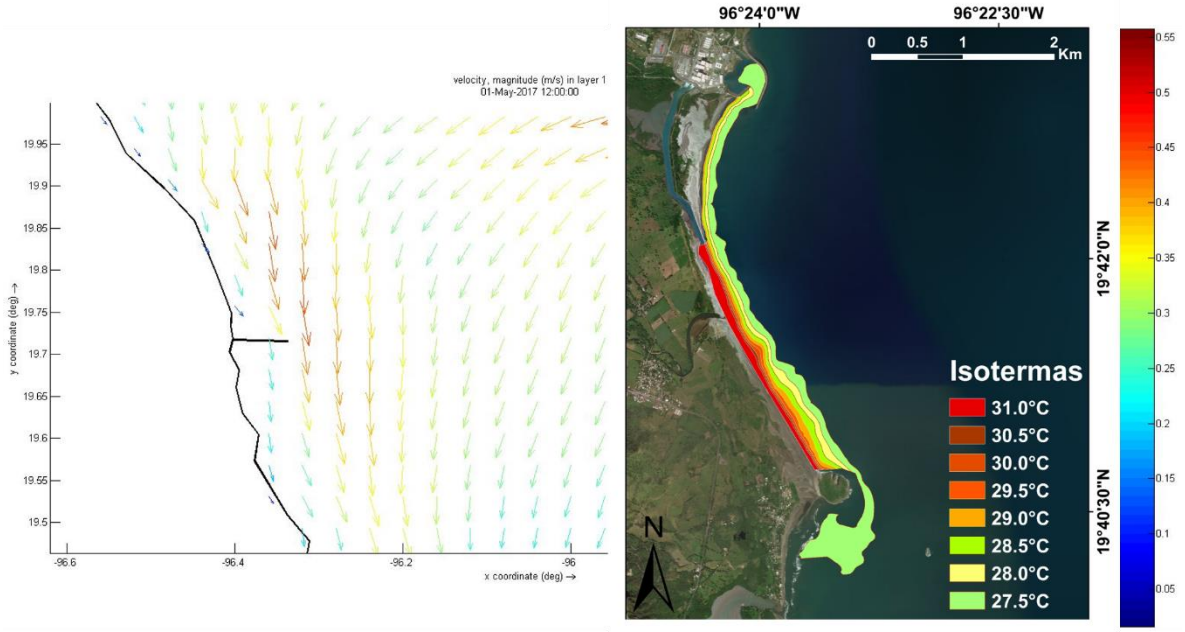


Figura 125. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 1 de mayo del 2017.

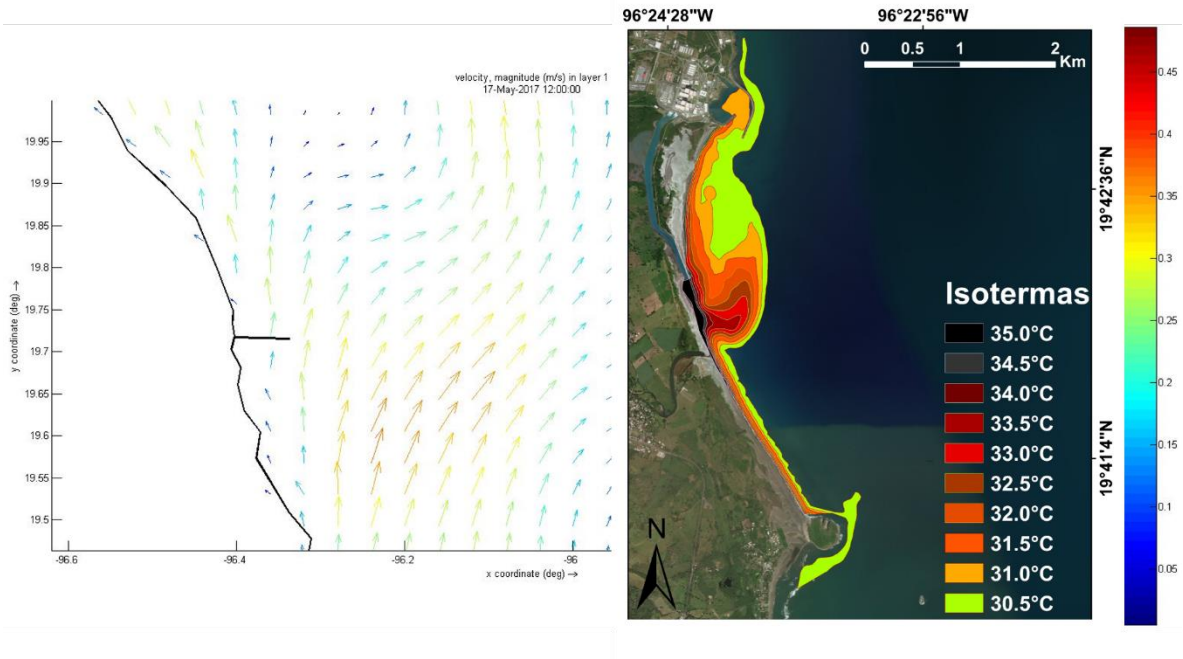


Figura 126. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 17 de mayo del 2017.

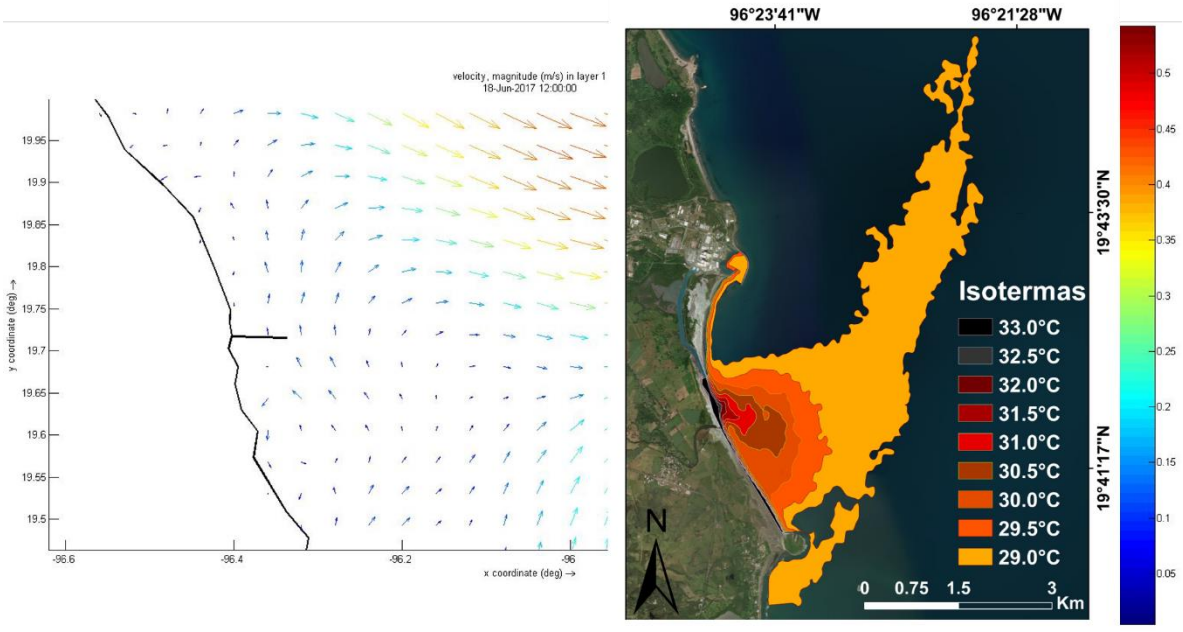


Figura 127. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 18 de junio del 2017.

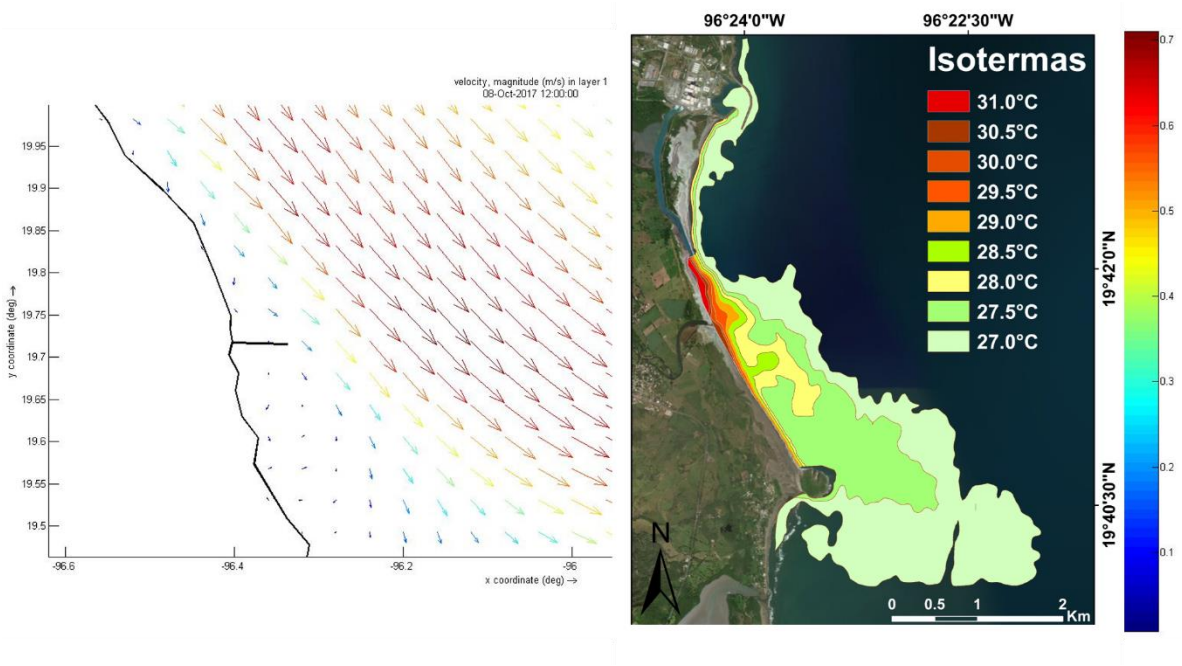


Figura 128. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 8 de octubre del 2017.

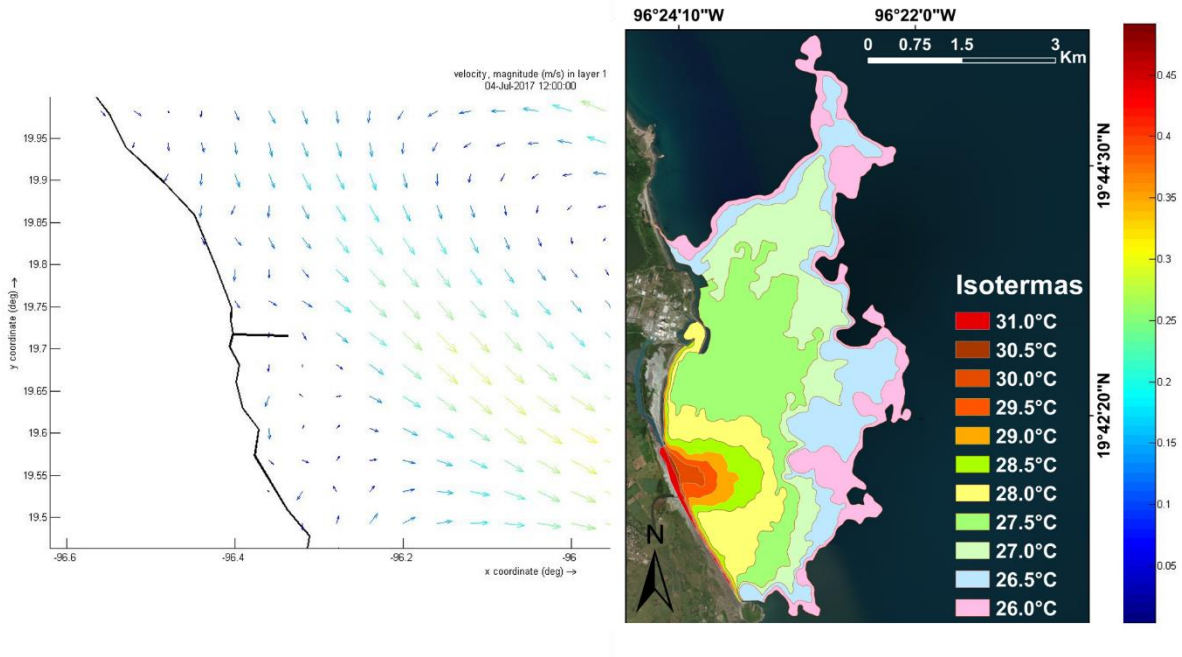


Figura 129. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 4 de julio del 2017.

Tabla 20. Relación entre la dirección de la dispersión de las PsTs y la dirección de las CM, Año 2017.

Año 2017					
Fecha	**Dirección (Plumas Térmicas)**	**Dirección (Grados)**	**Dirección (Corrientes Marinas)**	**Dirección (Grados)**	**Influencia**
25 de enero	Noreste	147°C	Noreste	127°C	Sí
26 de febrero	Sureste	56°C	Sureste	31°C	Sí
30 de marzo	Sureste	38°C	Noreste	42°C	Sí
15 de abril	Sureste	36°C	Sureste	29°C	Sí
1 de mayo	Sureste	24°C	Sur	23°C	Sí
17 de mayo	Norte	160°C	Norte	171°C	Sí
18 de junio	Noreste	141°C	Norte	144°C	Sí
4 de julio	Noreste	159°C	Sur	144°C	No
8 de octubre	Sureste	46°C	Sureste	35°C	Sí

Año 2018

En el 2018, 11 de 14 pares de imágenes (79%) dieron como resultado un nivel de influencia positivo entre la dirección de la dispersión de las plumas térmicas y la dirección de los vectores de las corrientes marinas obtenidas mediante la simulación en el HYCOM (17 de marzo (Figura 130), 2 de abril (Figura 131), 18 de abril (Figura 132), 4 de mayo (Figura 133), 20 de mayo (Figura 134), 5 de junio (Figura 135), 23 de julio (Figura 136), 24 de agosto (Figura 137), 9 de septiembre (Figura 138), 25 de septiembre (Figura 139) y 30 de diciembre (Figura 140)). Solo en tres pares de imágenes no se observó una correspondencia positiva (1 de marzo (Figura 141), 8 de agosto (Figura 142) y 12 de noviembre (Figura 143)). La Tabla 21 muestra el resumen comparativo de los resultados obtenidos entre la dirección de la dispersión de las plumas térmicas y la dirección de las corrientes marinas para este año 2018.

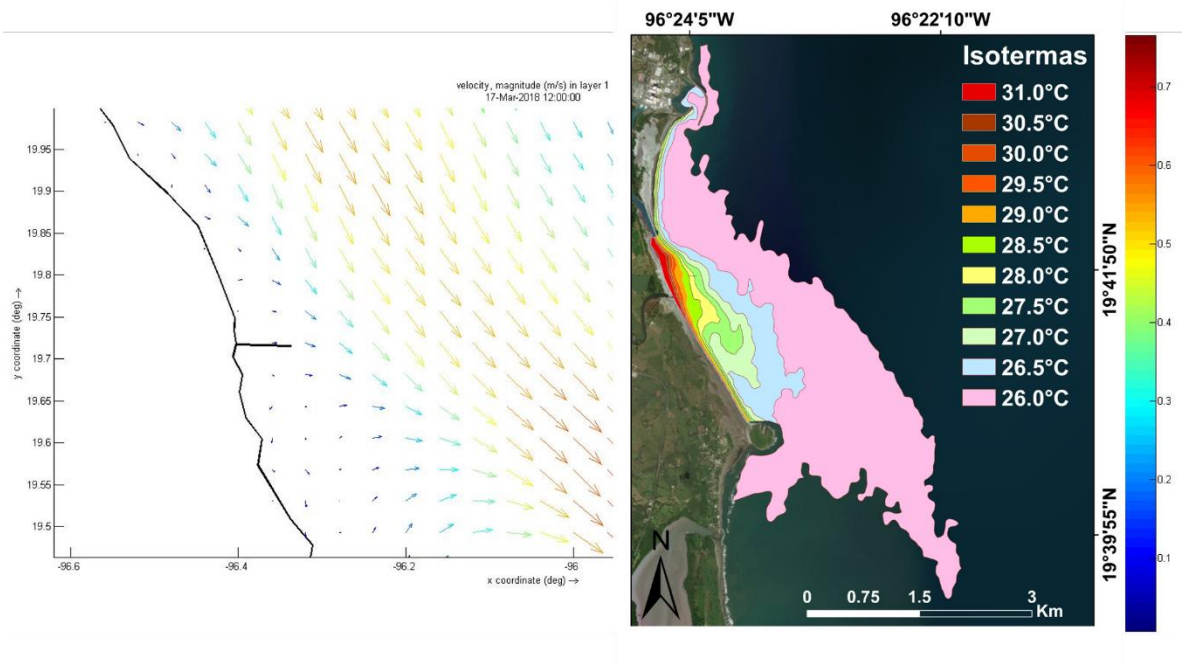


Figura 130. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 17 de marzo del 2018.

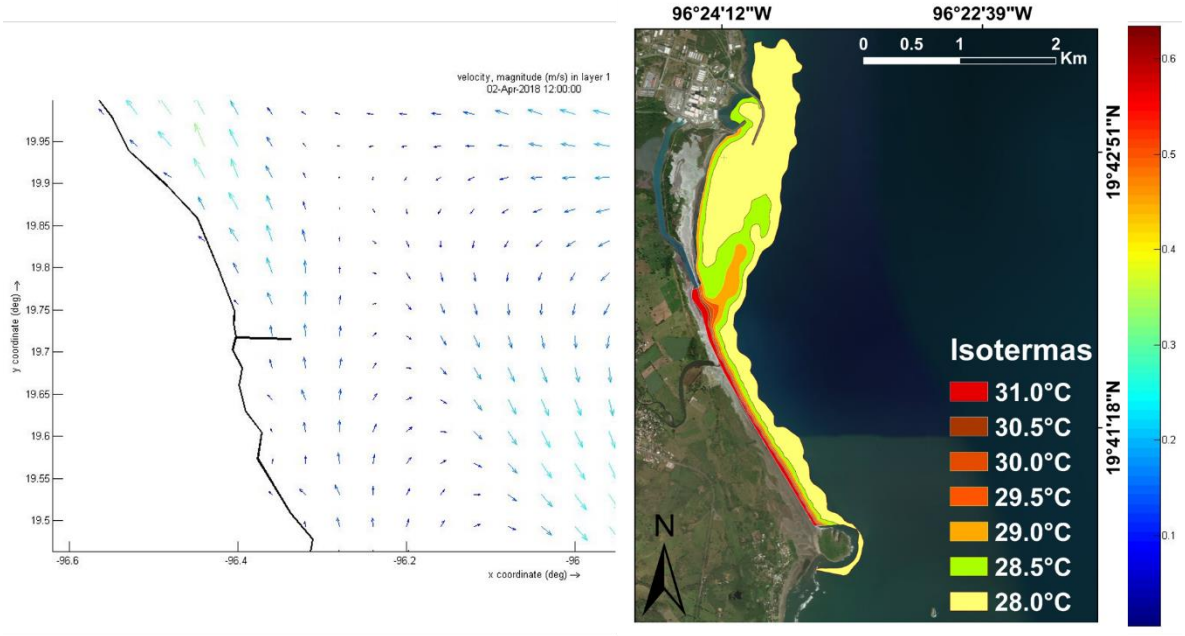


Figura 131. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 2 de abril del 2018.

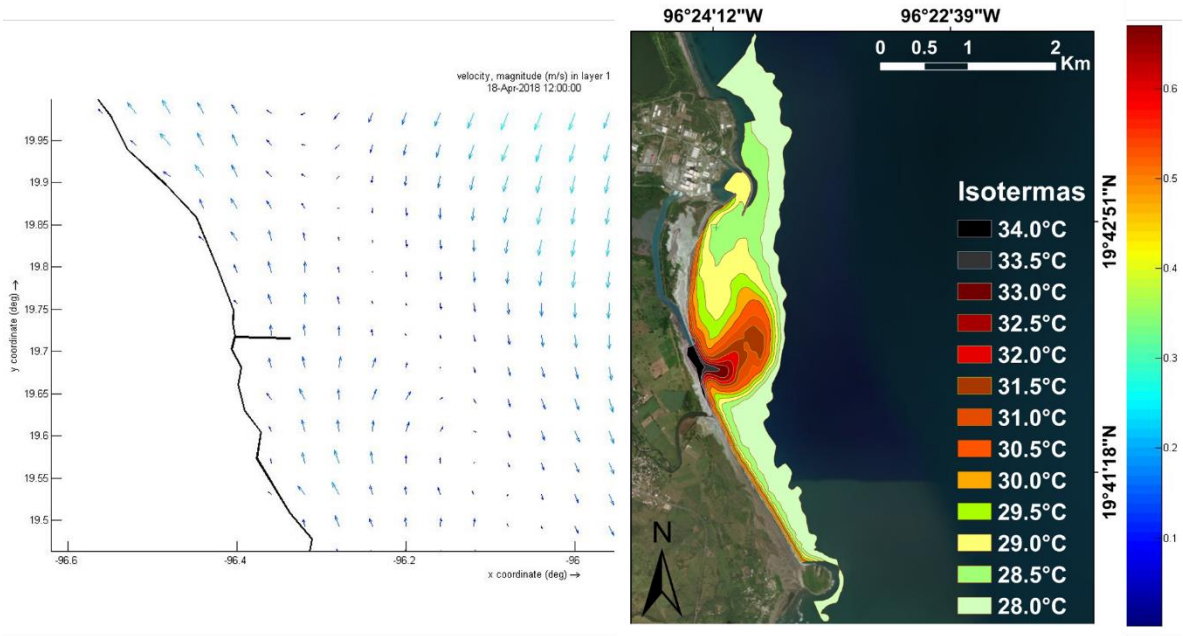


Figura 132. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 18 de abril del 2018.

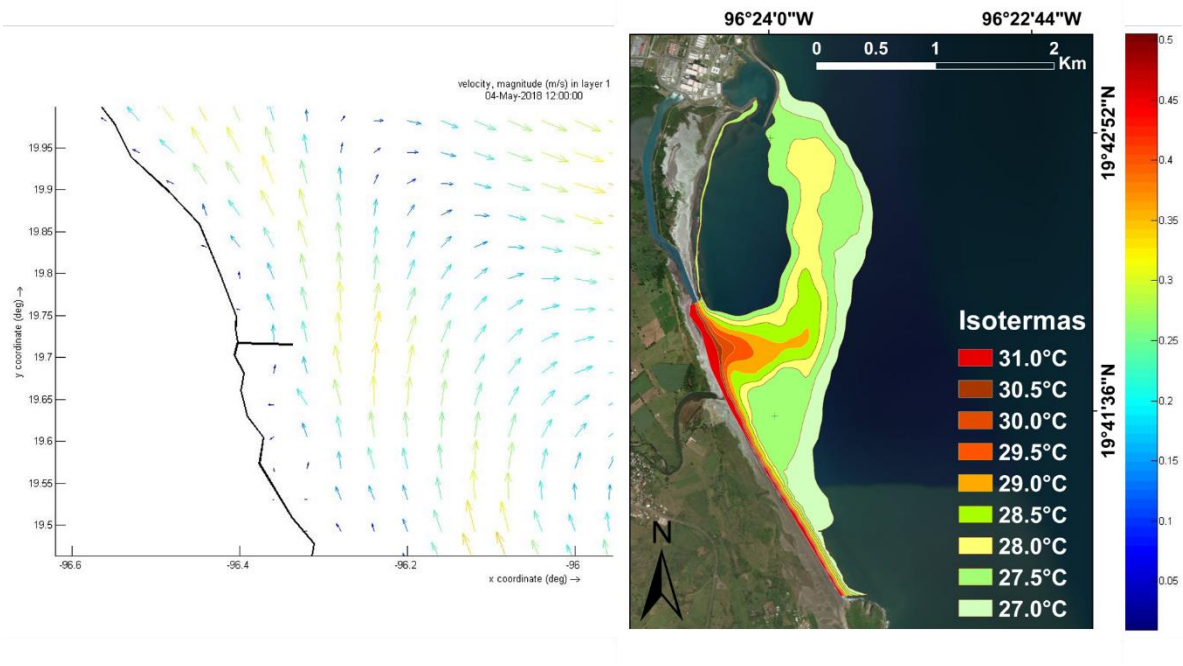


Figura 133. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 4 de mayo del 2018.

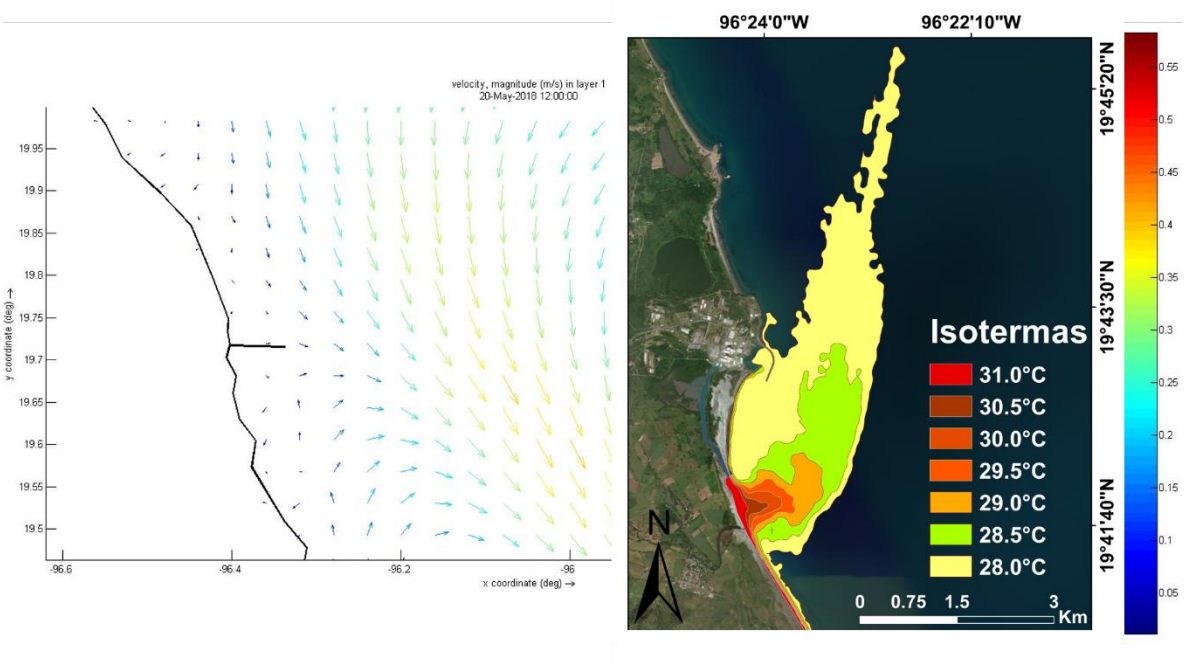


Figura 134. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 20 de mayo del 2018.

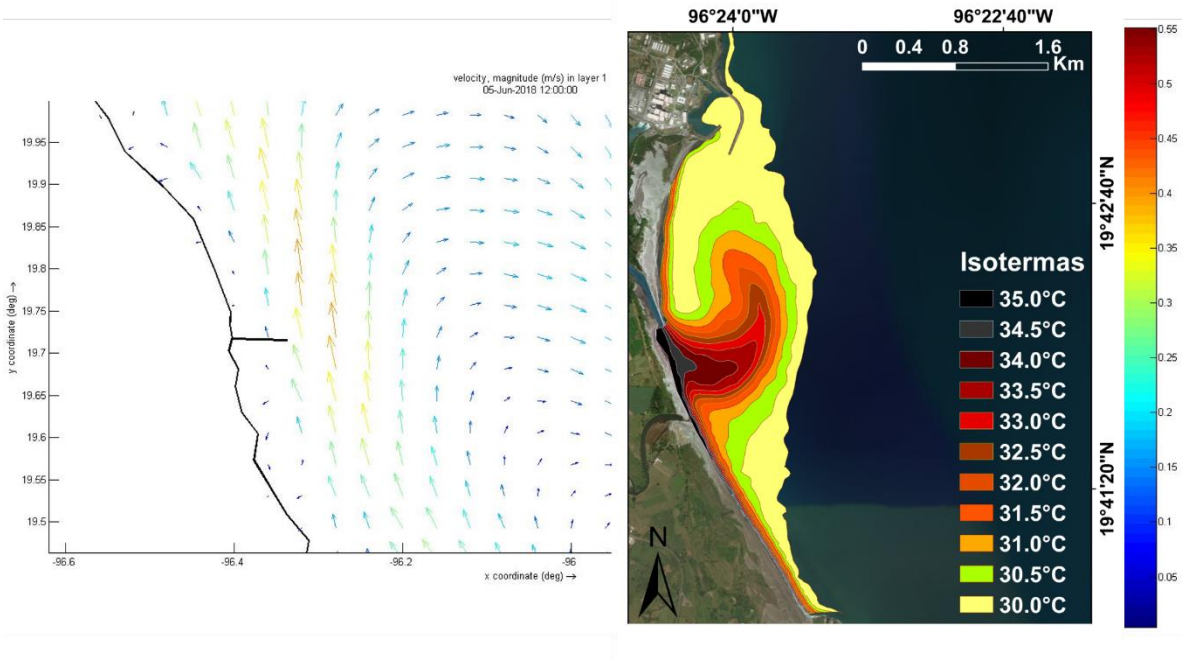


Figura 135. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 5 de junio del 2018.

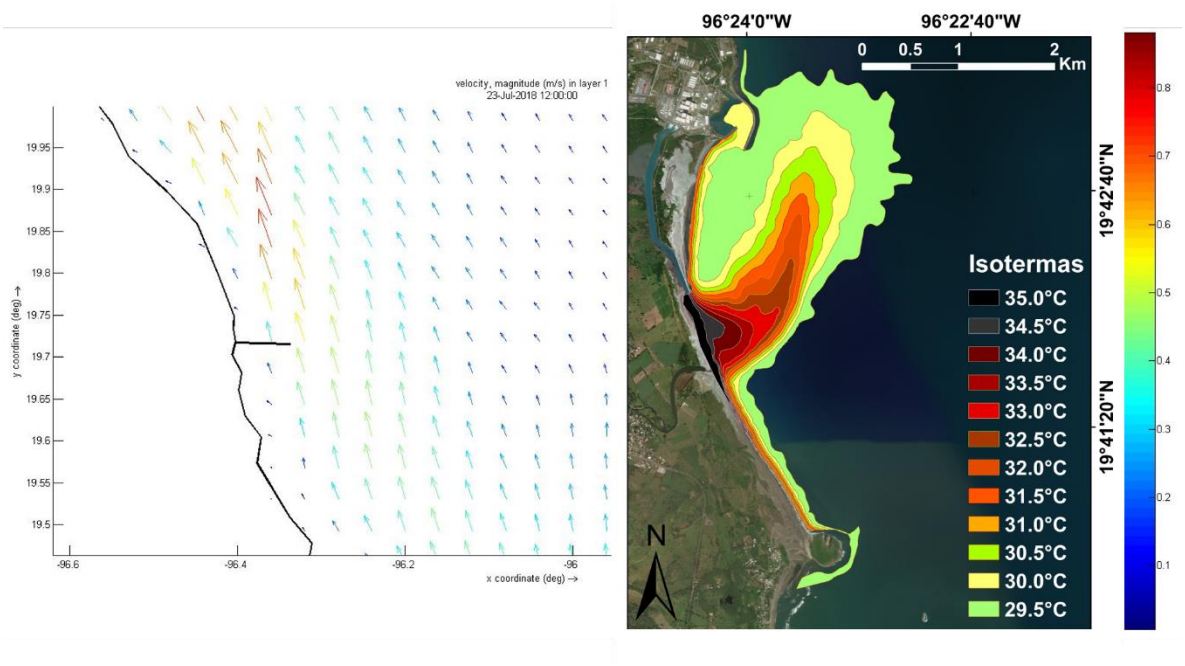


Figura 136. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 23 de julio del 2018.

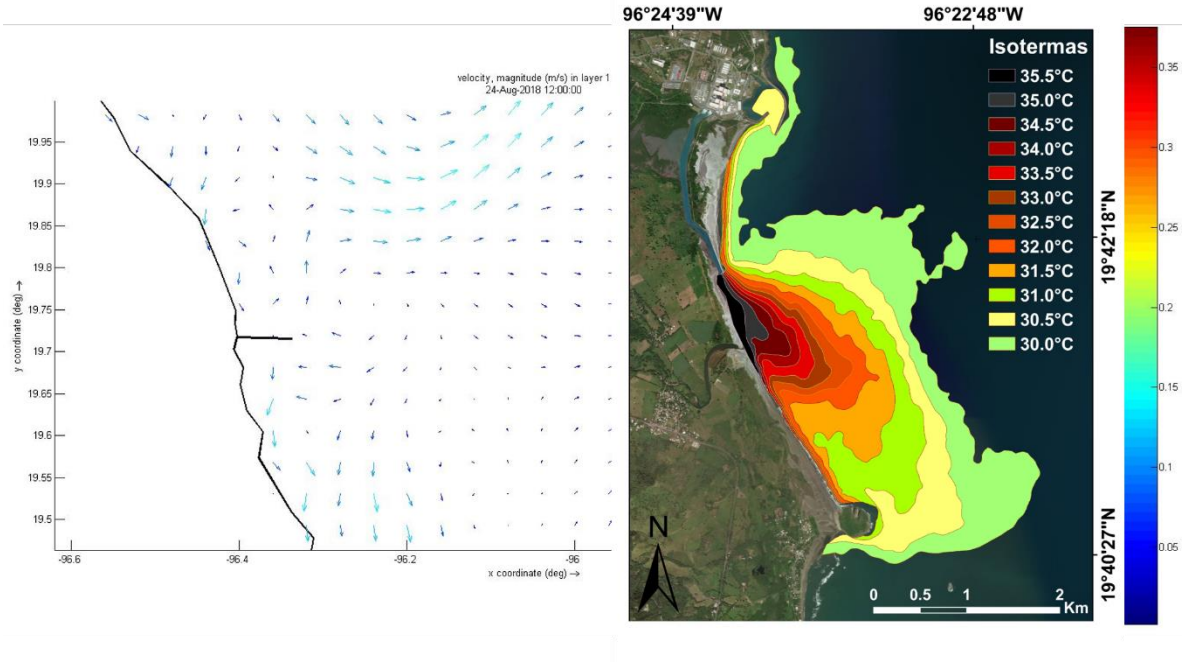


Figura 137. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 24 de agosto del 2018.

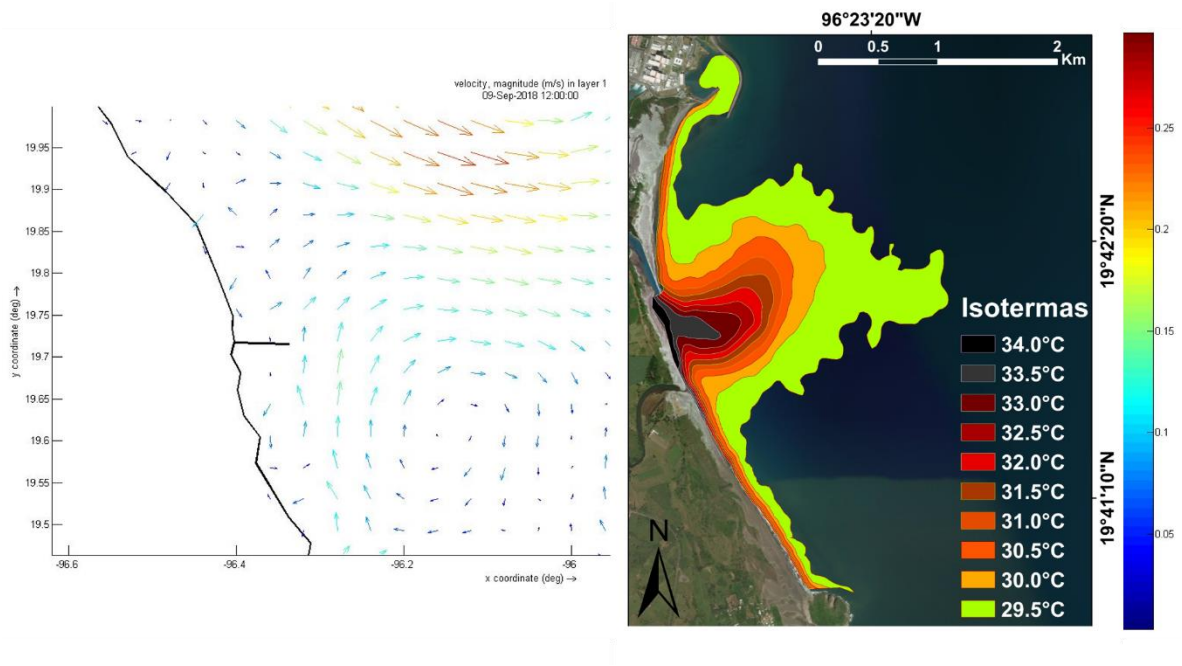


Figura 138. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 9 de septiembre del 2018.

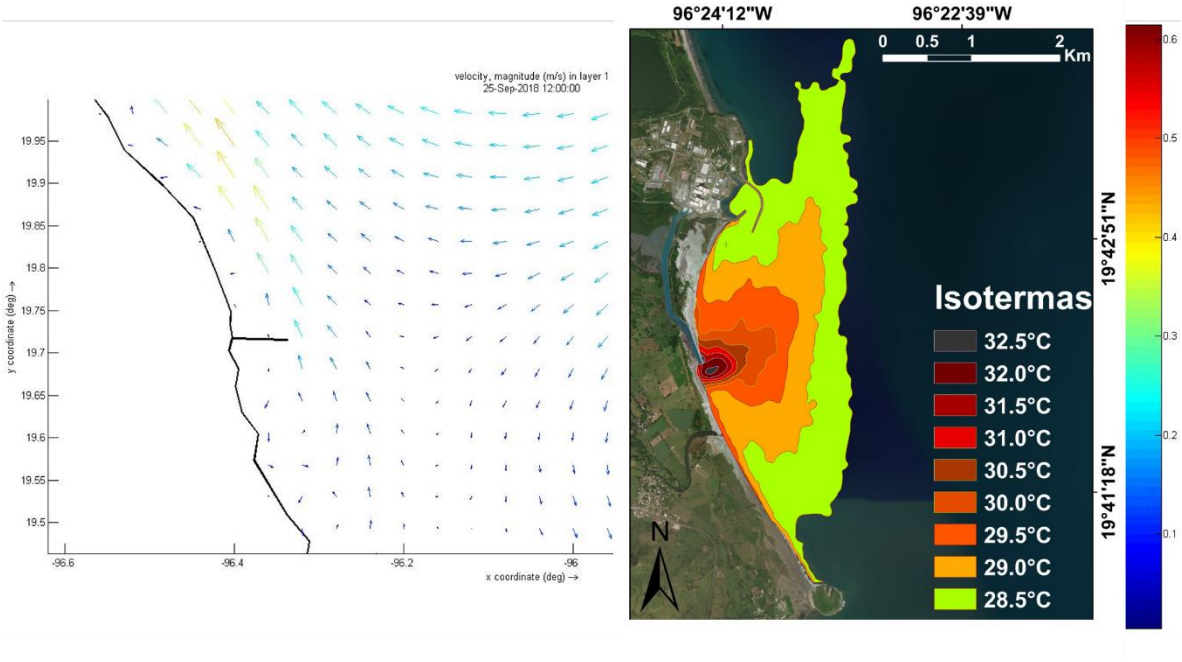


Figura 139. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 25 de septiembre del 2018.

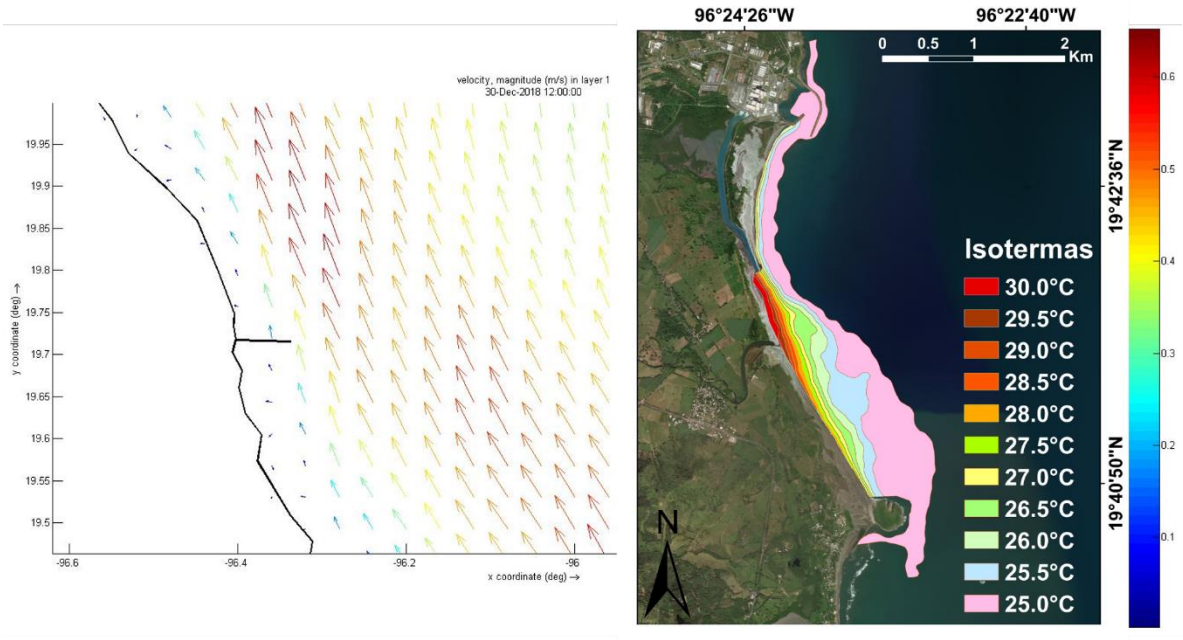


Figura 140. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 30 de diciembre del 2018.

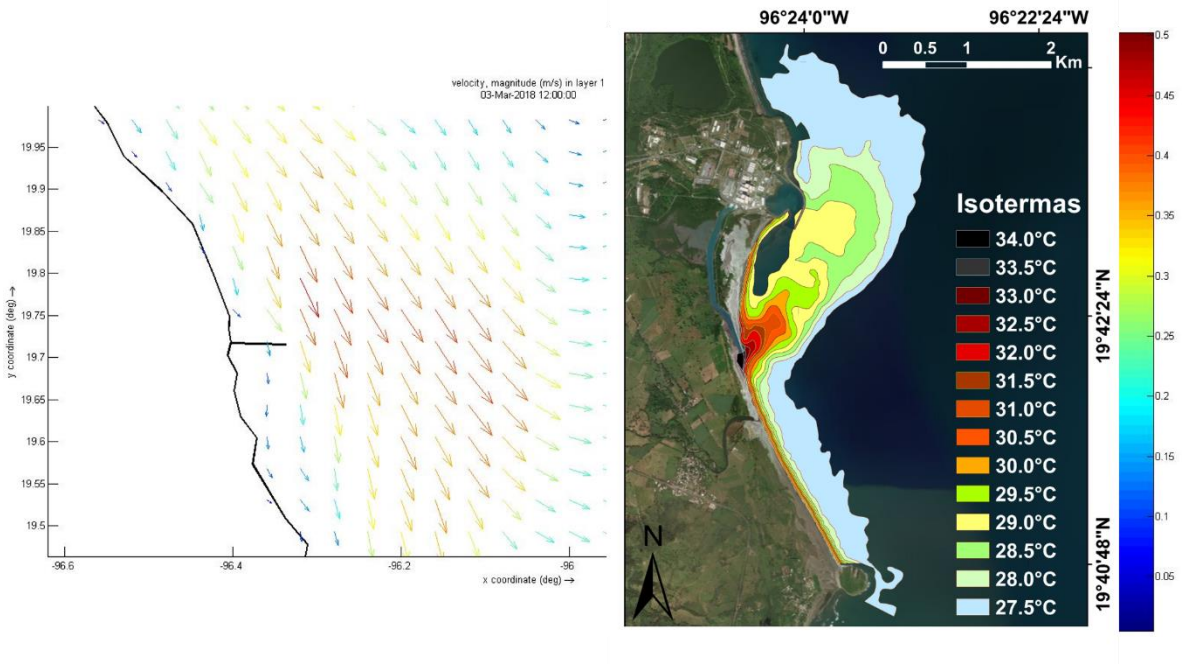


Figura 141. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 1 de marzo del 2018.

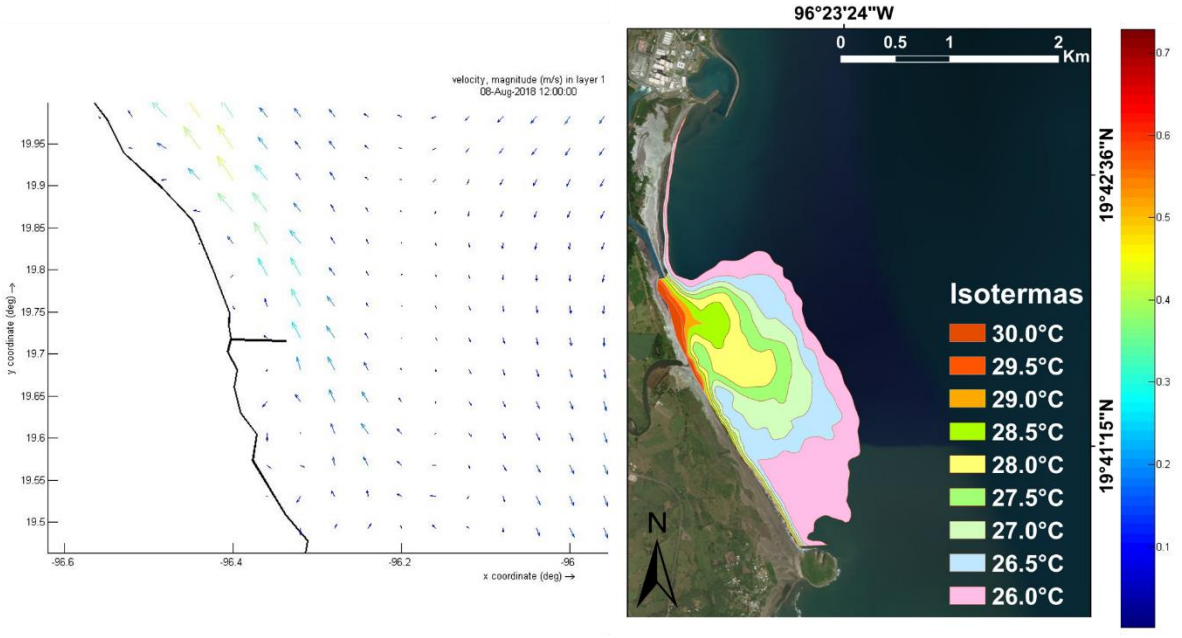


Figura 142. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 8 de agosto del 2018.

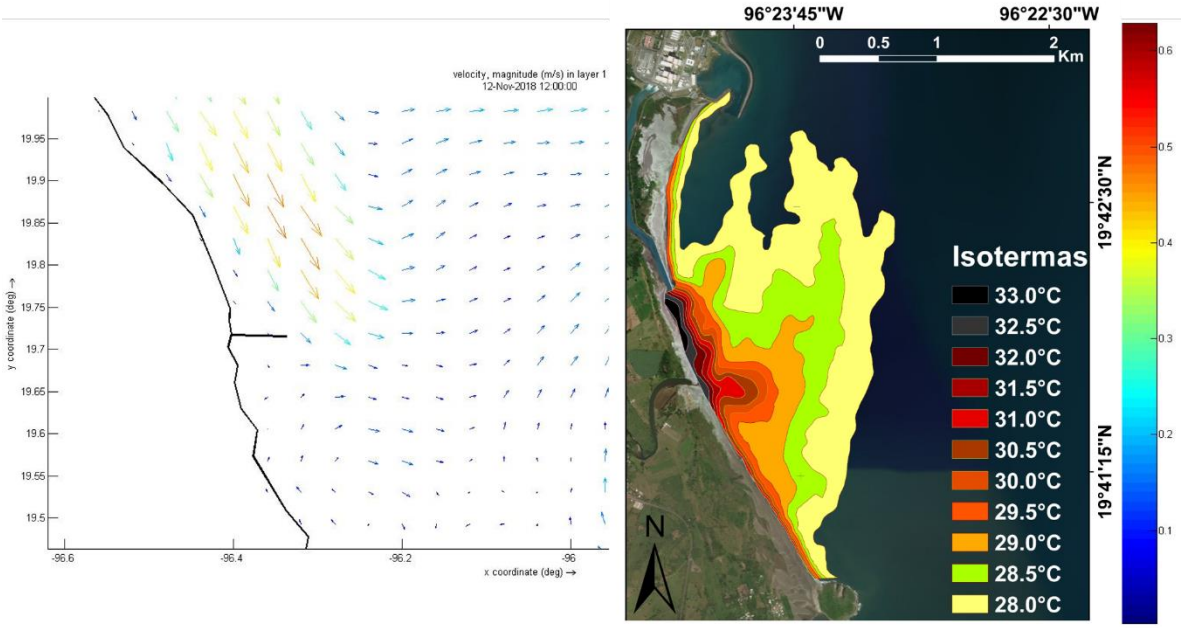


Figura 143. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 12 de noviembre del 2018.

Tabla 21. Relación entre la dirección de la dispersión de las PsTs y la dirección de las CM, Año 2018.

Año 2018					
Fecha	**Dirección (Plumas Térmicas)**	**Dirección (Grados)**	**Dirección (Corrientes Marinas)**	**Dirección (Grados)**	**Influencia**
1 de marzo	Noreste	171°C	Sureste	197°C	No
17 de marzo	Sureste	39°C	Sureste	62°C	Sí
2 de abril	Norte	160°C	Norte	153°C	Sí
18 de abril	Norte	168°C	Norte	191°C	Sí
4 de mayo	Norte	161°C	Norte	159°C	Sí
20 de mayo	Noreste	158°C	Noreste	145°C	Sí
5 de junio	Norte	166°C	Norte	164°C	Sí
23 de julio	Noreste	148°C	Norte	194°C	Sí
8 de agosto	Sureste	37°C	Norte	33°C	No
24 de agosto	Sureste	48°C	Sur	32°C	Sí
9 de septiembre	Este	90°C	Noreste	86°C	Sí
25 de septiembre	Norte	155°C	Norte	157°C	Sí
12 de noviembre	Norte	108°C	Sureste	99°C	No
30 de diciembre	Sureste	36°C	Norte	13°C	Sí

Año 2019

En el último año del período de esta investigación, se obtuvo como resultado una buena relación entre la dirección de la dispersión de las plumas térmicas y la dirección de los vectores que representan la simulación de las corrientes marinas en el HYCOM. En este caso en el 88% de los pares de imágenes comparados muestran una influencia positiva de las corrientes marinas en la dirección de la dispersión de las plumas térmicas (31 de enero (Figura 144), 16 de febrero (Figura 145), 21 de abril (Figura 146), 7 de mayo (Figura 147), 23 de mayo (Figura 148), 24 de junio (Figura 149) y 10 de julio (Figura 150)) que genera la descarga de aguas de refrigeración de la CNLV. Solo en el par de imágenes del 8 de junio (Figura 151) no se pudo observar una influencia positiva. En la Tabla 22 se muestra el resumen comparativo de los resultados.

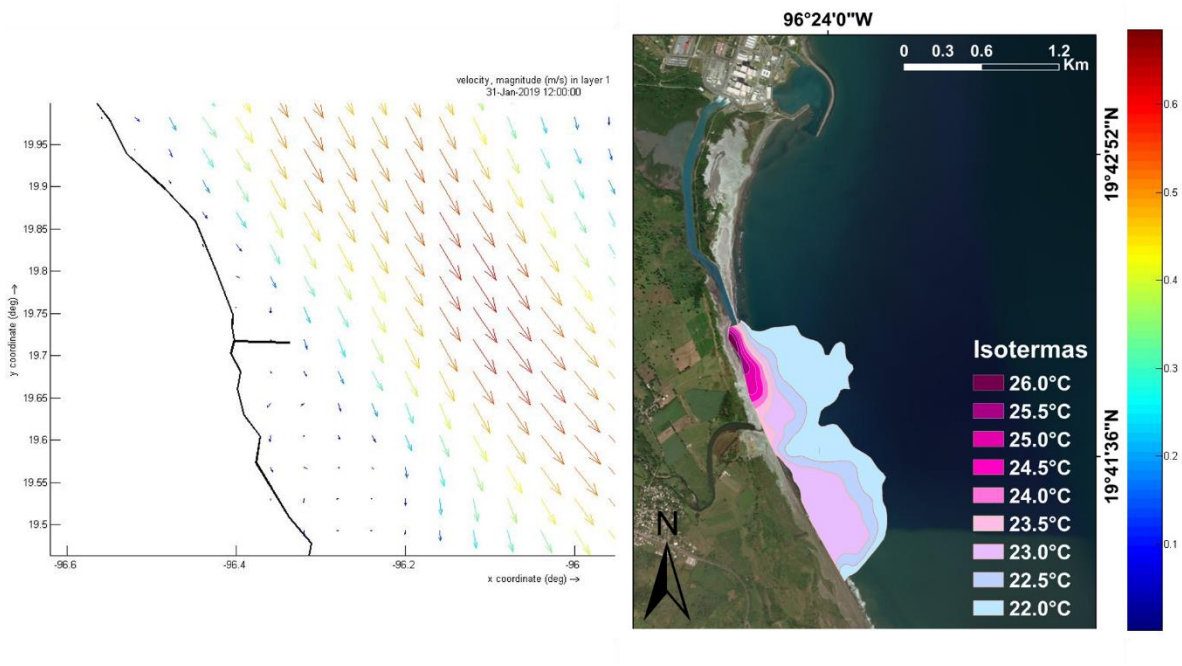


Figura 144. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 31 de enero del 2019.

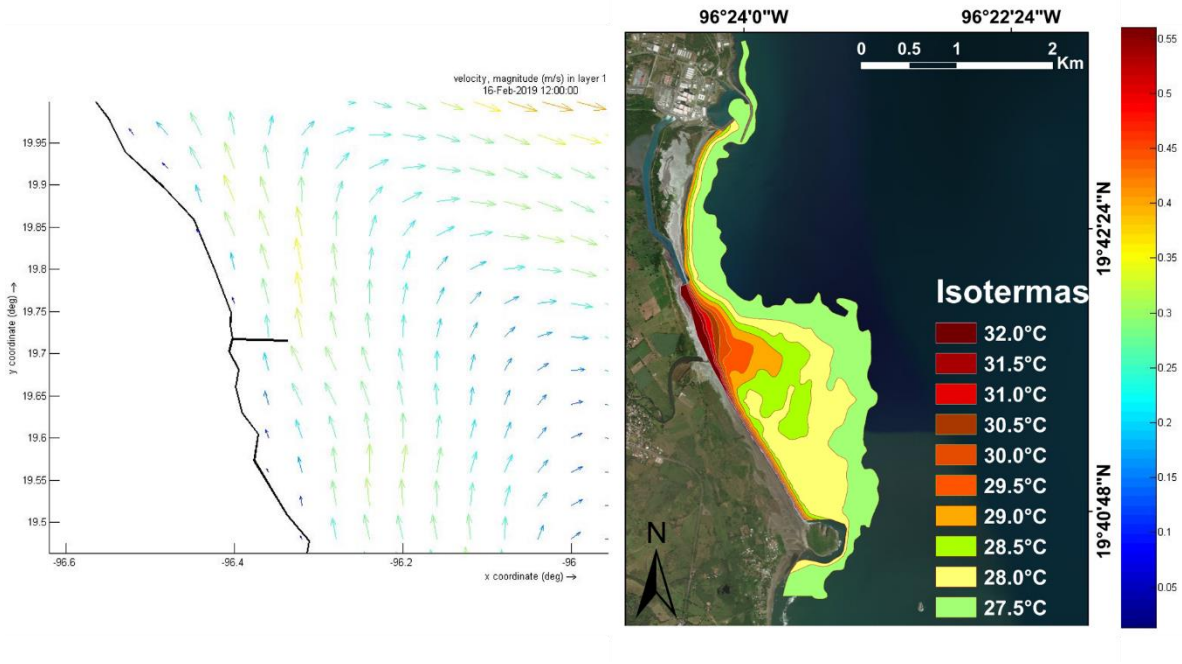


Figura 145. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 16 de febrero del 2019.

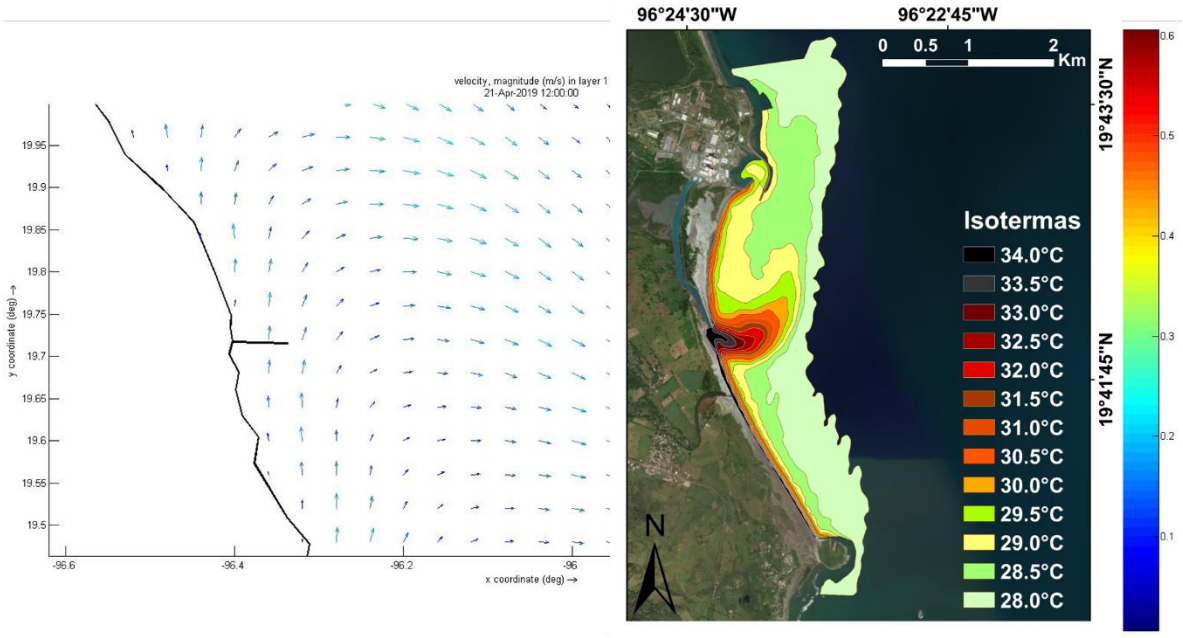


Figura 146. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 21 de abril del 2019.

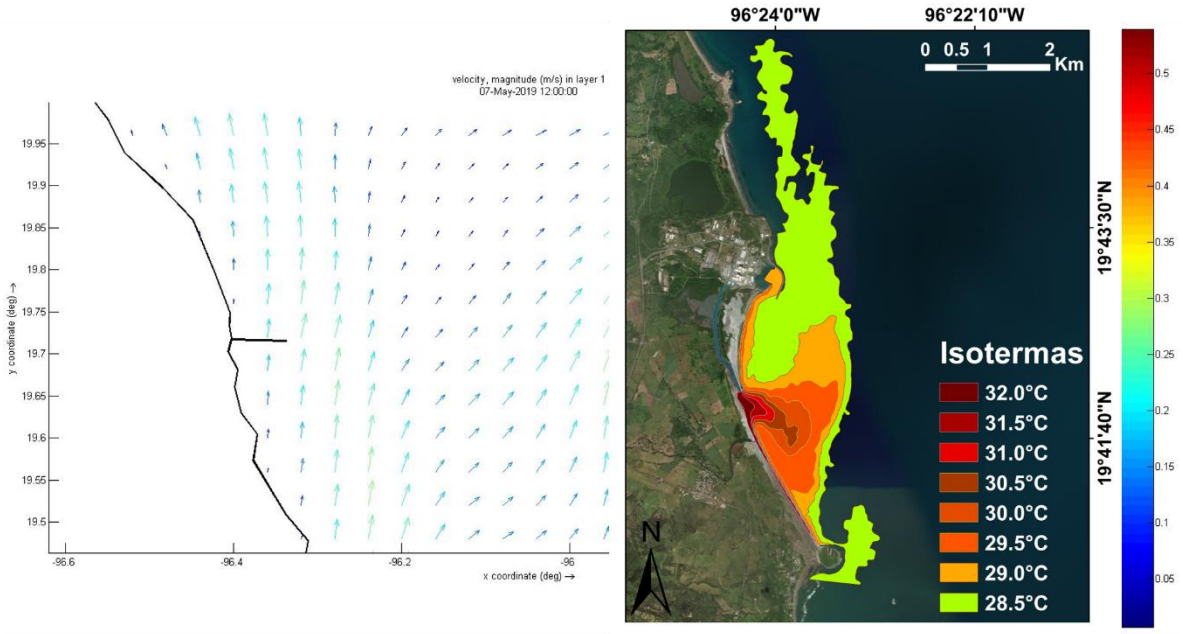


Figura 147. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 7 de mayo del 2019.

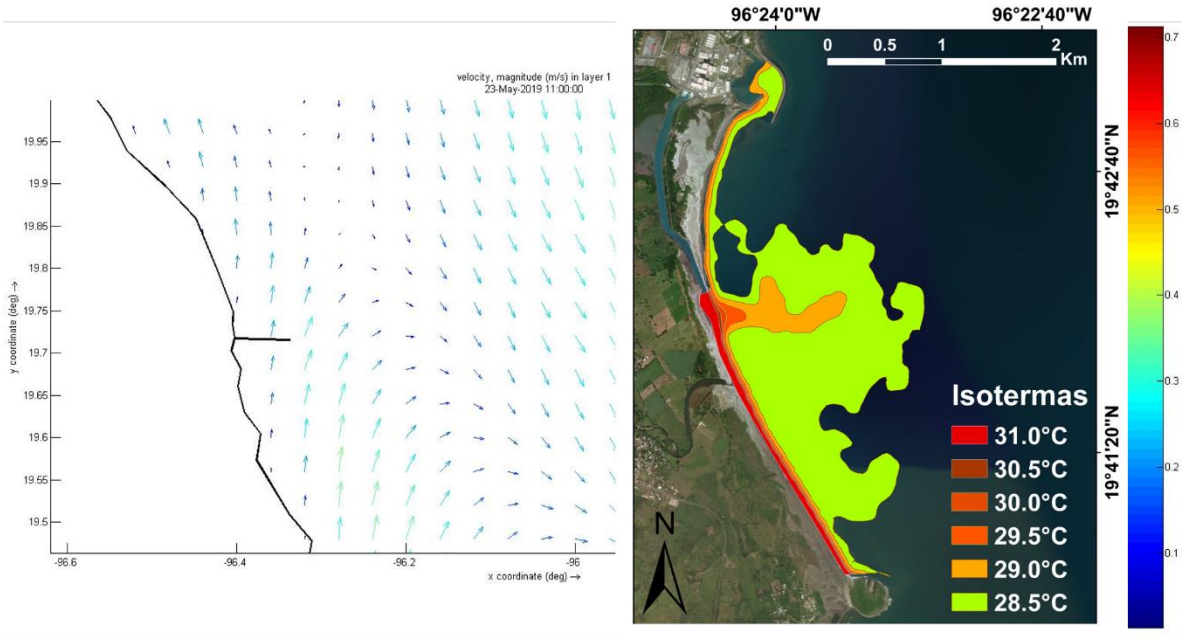


Figura 148. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 23 de mayo del 2019.

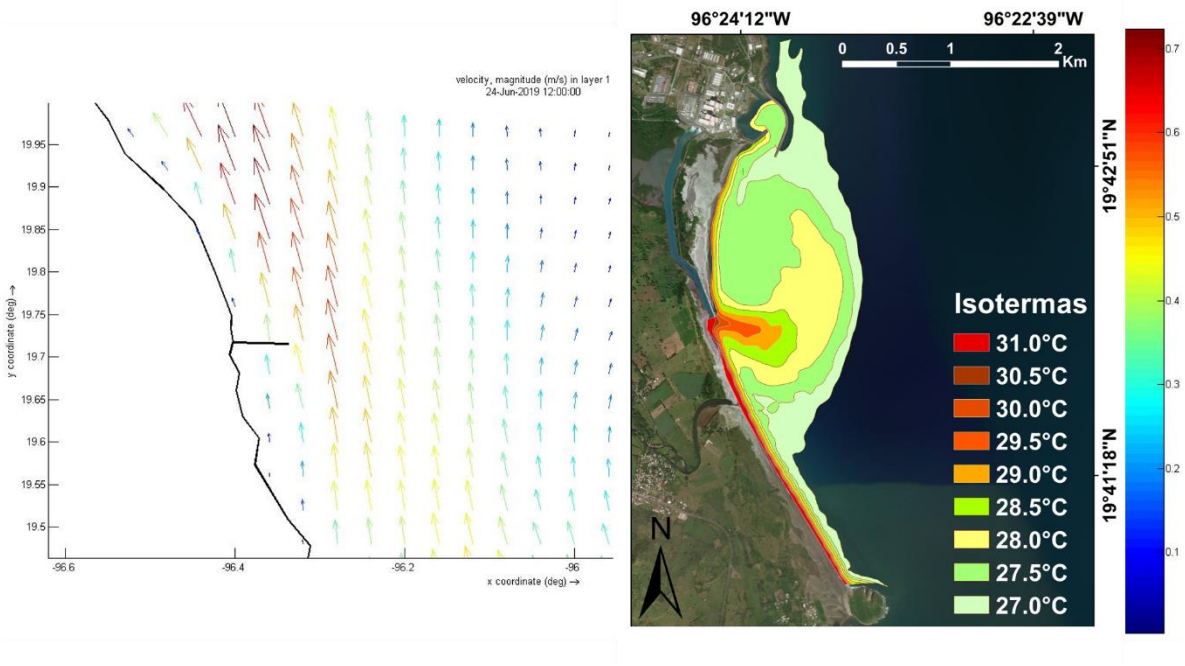


Figura 149. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 24 de junio del 2019.

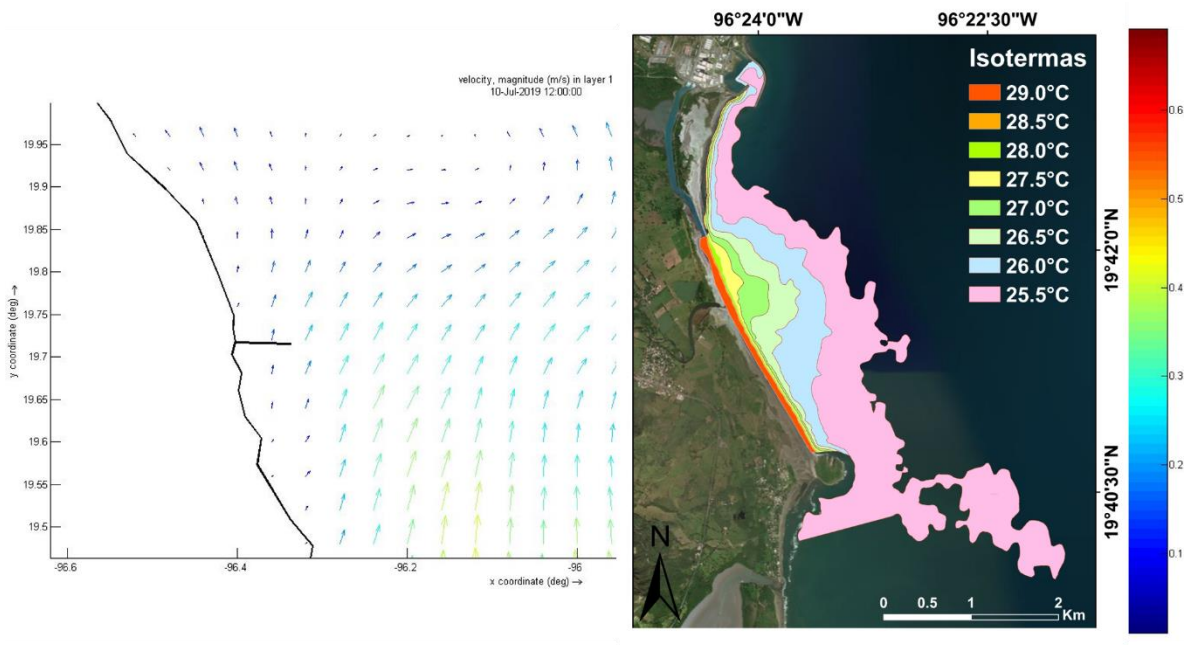


Figura 150. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 10 de julio del 2019.

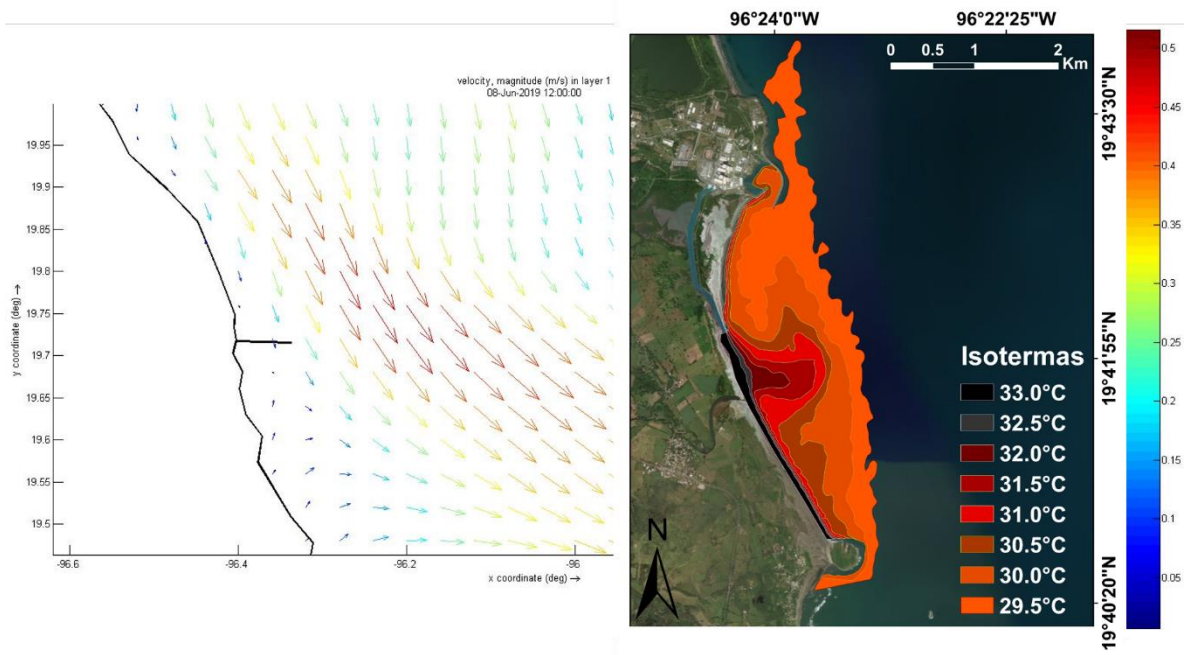


Figura 151. Relación existente entre las corrientes marinas y la PT del 8 de junio del 2019.

Tabla 22. Relación entre la dirección de la dispersión de las PsTs y la dirección de las CM, Año 2019.

Año 2019					
Fecha	**Dirección (Plumas Térmicas)**	**Dirección (Grados)**	**Dirección (Corrientes Marinas)**	**Dirección (Grados)**	**Influencia**
31 de enero	Este	26°C	Norte	21°C	Sí
16 de febrero	Sureste	37°C	Norte	38°C	Sí
21 de abril	Norte	157°C	Norte	177°C	Sí
7 de mayo	Norte	174°C	Norte	177°C	Sí
23 de mayo	Este	36°C	Norte	48°C	Sí
8 de junio	Norte	165°C	Sureste	169°C	No
24 de junio	Norte	164°C	Norte	188°C	Sí
10 de julio	Sureste	45°C	Noreste	28°C	Sí

7.2.5. Análisis Direccional

Para poder analizar los resultados obtenidos en cuanto a las direcciones de las plumas térmicas y de los vectores que representan las corrientes marinas, se realizó una correlación circular entre estos dos factores (Dirección de las Plumas Térmicas y Dirección de las Corrientes Marinas). Cuando se realizó la correlación circular en el software Past-3 se obtuvo un coeficiente de 0.96989, lo que significa que entre estos dos factores existe una fuerte correlación y por ende una influencia significativa entre la dirección de las corrientes marinas y la dirección de la dispersión que tienen las plumas térmicas como se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23. Correlación circular entre la dirección de las PsTs y la dirección de las CM.

Análisis Direccional_Correlación Circular (CC)	
Variables	
Dirección Pluma Térmica	**Dirección Corrientes Marinas**
N=68	
Media: 97.545	Media: 95.139
Coeficiente de Correlación Circular: 0.96989	
Prueba de Jammalamadaka-Sengupta para CC	
T= 7.2267	p(uncorr)= 0.0000000000071626

Por otra parte, también se realizó un análisis direccional circular (ADC) (Figura 152) de dos muestras para analizar las diferencias existentes entre la dirección de la dispersión de las plumas térmicas y la dirección de las corrientes marinas, en los períodos de lluvias y secas; con el objetivo de conocer el comportamiento de cada uno de los factores en cada período. Se obtuvieron como resultados en las pruebas realizadas que los datos de la dirección de las plumas térmicas (Tabla 24) y las corrientes marinas (Tabla 25) eran uniformes tanto en

el período de lluvias como en el período de secas (p>0.05), que no hay diferencias significativas en las medias y en las distribuciones, y que las distribuciones se concentran alrededor de la media (Overall Kappa>0).

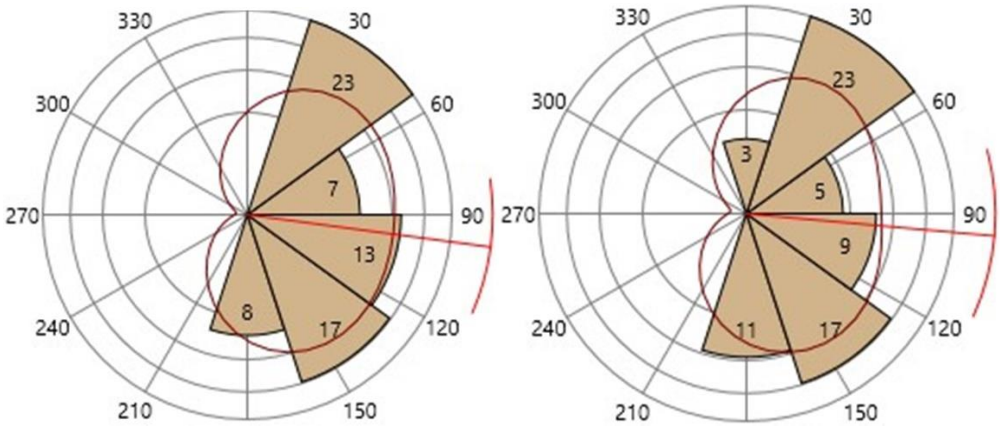


Figura 152. Diagrama de rosas (histograma polar) de las direcciones de dispersión de las plumas térmicas (izquierda) y de las corrientes marinas (derecha).

Tabla 24. Resultados obtenidos del ADC de la dirección de la dispersión de las PsTs.

Análisis Direccional (2 muestras)	
Variables	
Lluvias (Pluma Térmica)	Secas (Pluma Térmica)
N= 38	N= 30
Media= 109.08	Media= 83.06
Rayleigh´s R= 24.30	Rayleigh´s R= 19.42
Prueba de Watson-William	
Overall Kappa= 1.70	Overall R= 42.61
U= 3.67	p (same mean)= 0.06

Tabla 25. Resultados obtenidos del Análisis Direccional Circular de la dirección de las corrientes marinas.

Análisis Direccional (2 muestras)	
Variables	
Lluvias (Corrientes Marinas)	Secas (Corrientes Marinas)
N= 38	N= 30
Media= 108.46	Media= 77.67
Rayleigh´s R= 21.31	Rayleigh´s R= 16.35
Prueba de Watson-William	
Overall Kappa= 1.34	Overall R= 36.33
U= 3.70	p (same mean)= 0.059

8. CONCLUSIONES

En la presente investigación, mediante el uso de la teledetección utilizando la información de las bandas infrarrojas térmicas a bordo del satélite Landsat-8 , hemos sido capaces de determinar las plumas térmicas en el período 2013-2019 que se generan a partir de las descargas de las aguas de refrigeración de la CNLV, por lo que se generó una base de datos accesible para las partes interesadas pertinentes y los decisores a todos los niveles en Laguna Verde. No obstante, solo se pudieron procesar 68 imágenes (49%) de un total de 140 imágenes, debido a que, en el resto de las imágenes, la zona de estudio presentó un alto índice de nubosidad, lo que impidió el procesamiento de las mismas.

Se logró estimar con un margen de ECM aceptable de 1.18°C, los parámetros geométricos-estadísticos que caracterizan estas plumas térmicas, así como su forma, dimensión y dirección de la dispersión, a pesar de las diferencias existentes en las temporalidades de las fechas generado por la falta de información. Además, se logró identificar las plumas térmicas que tienen un proceso de recirculación hacia la obra de tomas de la CNLV. En cuanto a la calibración de la temperatura superficial del mar en la zona de estudio, se obtuvo el coeficiente de emisividad óptimo para la misma con un valor de 0.966; lo que permitirá su uso en futuras investigaciones.

Por otra parte, gracias a la formación referente a las corrientes marinas obtenidas del Consorcio HYCOM y al ADC realizado, se pudo llegar a la conclusión de que existe una estrecha relación y una fuerte correlación entre la dirección de la dispersión de las plumas térmicas y las corrientes marinas; lo que posibilitará la predicción de las futuras orientaciones de las plumas térmicas utilizando la información pertinente que el HYCOM es capaz de simular.

También, con la implementación y ajuste de la metodología de Plank en la presente investigación, se demuestra que se pueden obtener resultados aceptables sin la necesidad de contar con la alta demanda de información de variables meteorológicas y de otra índole que requieren otros algoritmos de recuperación de TsM como el algoritmo de una sola ventana (Mono Window) y el algoritmo de ventana dividida (Split Window).

Adicionalmente, la presente investigación se enmarca en la línea de investigación de teledetección y SIG aplicados al estudio y análisis de plumas térmicas generadas por el proceso de descarga térmica hacia zonas costeras en centrales nucleoeléctricas.

9. RECOMENDACIONES

En la presente investigación, debido a la falta de información disponible existente en la zona de estudio, se recomienda a las autoridades pertinentes realizar estudios y mediciones in situ, utilizando boyas oceanográficas u otros instrumentos de medición, para poder obtener mediciones exactas en correspondencia con las fechas obtenidas del satélite Landsat-8; y en consecuencia lograr una optimización de la metodología empleada para recuperar la TsM. Por otra parte, se recomienda que, si existiera información disponible referente a mediciones in situ en la zona de estudio, permitan el acceso a la utilización de esta en futuras investigaciones científicas.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcântara, E. H., Stech, J. L., Lorenzzetti, J. A., Bonnet, M. P., Casamitjana, X., Assireu, A. T., & de Moraes Novo, E. M. L. (2010). Remote sensing of water surface temperature and heat flux over a tropical hydroelectric reservoir. *Remote Sensing of Environment*, *114*(11), 2651-2665.

Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of irrigation and drainage engineering*, *133*(4), 380-394.

Anupkumar, B., Rao, T., Venugopalan, V., & Narasimhan, S. (2005). Thermal mapping in the Kalpakkam Coast (Bay of Bengal) in the vicinity of Madras atomic power station. *International journal of environmental studies*, *62*(4), 473-485.

Botello, A. V. (2005). *Golfo de México: Contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y tendencias*. Univ. J. Autónoma de Tabasco.

C. I. Campos. (2006). *Modelación matemática de descargas térmicas en medios marinos. Aplicación a la descarga de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde.* [Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias]. Instituto Politécnico Nacional.

Campos, C. I. (2006). *Modelación matemática de descargas térmicas en medios marinos. Aplicación a la descarga de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde.* Instituto Politécnico Nacional.

Chen, C., Shi, P., & Mao, Q. (2003). Application of remote sensing techniques for monitoring the thermal pollution of cooling-water discharge from nuclear power plant. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, *38*(8), 1659-1668.

Chuvieco, E. (1996). Fundamentos de teledetección espacial. 3ra. *Edic. Rialp. Madrid, España*, *574*.

Coll, C., Caselles, V., Valor, E., & Niclòs, R. (2012). Comparison between different sources of atmospheric profiles for land surface temperature retrieval from single channel thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment*, *117*, 199-210.

Cooper, C., Forristall, G. Z., & Joyce, T. M. (1990). Velocity and hydrographic structure of two Gulf of Mexico warm-core rings. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *95*(C2), 1663-1679.

Crema, R., & Pagliai, A. B. (1980). The structure of benthic communities in an area of thermal discharge from a coastal power station. *Marine Pollution Bulletin*, *11*(8), 221-224.

De Sa, A., & Al Zubaidy, S. (2011). Gas turbine performance at varying ambient temperature. *Applied Thermal Engineering*, *31*(14-15), 2735-2739.

Demars, B., & Manson, J. (2013). Temperature dependence of stream aeration coefficients and the effect of water turbulence: A critical review. *Water Research*, *47*(1), 1-15.

Devinny, J. (1980). Effects of thermal effluents on communities of benthic marine macroalgae. *Journal of Environmental Management*, *11*(3).

Ding, H., & Elmore, A. J. (2015). Spatio-temporal patterns in water surface temperature from Landsat time series data in the Chesapeake Bay, USA. *Remote Sensing of Environment*, *168*, 335-348.

Du, C., Ren, H., Qin, Q., Meng, J., & Zhao, S. (2015). A practical split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 data. *Remote Sensing*, *7*(1), 647-665.

Durmayaz, A., & Sogut, O. S. (2006). Influence of cooling water temperature on the efficiency of a pressurized-water reactor nuclear-power plant. *International Journal of Energy Research*, *30*(10), 799-810.

Elliott, B. A. (1982). Anticyclonic rings in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, *12*(11), 1292-1309.

Faulkner, A., Bulgin, C. E., & Merchant, C. J. (2019). Coastal Tidal Effects on Industrial Thermal Plumes in Satellite Imagery. *Remote Sensing*, *11*(18), 2132.

Fisher, J. I., & Mustard, J. F. (2004). High spatial resolution sea surface climatology from Landsat thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment*, *90*(3), 293-307.

Fleischli, S., & Hayat, B. (2014). Power plant cooling and associated impacts: The need to modernize US power plants and protect our water resources and aquatic ecosystems. *Natural Resources Defense Council (https://www. nrdc. org/sites/default/files/power-plant-cooling-IB. pdf)*.

Forristall, G. Z., Schaudt, K. J., & Cooper, C. K. (1992). Evolution and kinematics of a Loop Current eddy in the Gulf of Mexico during 1985. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *97*(C2), 2173-2184.

Gierach, M. M., Holt, B., Trinh, R., Pan, B. J., & Rains, C. (2017). Satellite detection of wastewater diversion plumes in Southern California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *186*, 171-182.

Handcock, R., Gillespie, A., Cherkauer, K., Kay, J., Burges, S., & Kampf, S. (2006). Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales. *Remote Sensing of Environment*, *100*(4), 427-440.

Hedger, R. D., Malthus, T. J., Folkard, A. M., & Atkinson, P. M. (2007). Spatial dynamics of estuarine water surface temperature from airborne remote sensing. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *71*(3-4), 608-615.

Herrera-Díaz, I., Couder-Castaneda, C., & Ramírez León, H. (2011). A fast simulation method for wave transformation processes in coastal zones. *Journal of applied research and technology*, *9*(2), 249-272.

Herrera-Díaz, I.-E., Couder-Castañeda, C., & Ramírez-León, H. (2010). A case study of nearshore wave transformation processes along the coast of Mexico near the Laguna verde nuclear power plant using a fast simulation method. *Modelling and Simulation in Engineering*, *2010*, 8.

Hook, S. J., Chander, G., Barsi, J. A., Alley, R. E., Abtahi, A., Palluconi, F. D., Markham, B. L., Richards, R. C., Schladow, S. G., & Helder, D. L. (2004). In-flight validation and recovery of water surface temperature with Landsat-5 thermal infrared data using an automated high-altitude lake validation site at Lake Tahoe. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *42*(12), 2767-2776.

Huang, X., Zhu, Z., Xu, M., & Jing, Q. (1998). Variation of water temperature in the southwestern Daya Bay before and after the operation of Daya Bay nuclear power plant. *Pan JP, Wang ZD, Annual Research Reports (II): Marine Biology Research Station at Daya Bay. Science Publishing House, Beijing, China*, 102-112.

InspirAction: Por un mundo libre de pobreza. (s. f.). https://www.inspiraction.org

Jensen, J. R., Pace, P. J., & Christensen, E. J. (1983). Remote sensing temperature mapping: The thermal plume example. *The American Cartographer*, *10*(2), 111-128.

Jiang, J., & Fissel, D. B. (2004). Numerical Modeling Study of Cooling Water Recirculation. En *Estuarine and Coastal Modeling (2003)* (pp. 512-527).

Jiménez, H., & Botello, A. (1996). *Evolución del Impacto Ambiental de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde.*

Jiménez-Muñoz, J. C., Cristóbal, J., Sobrino, J. A., Sòria, G., Ninyerola, M., & Pons, X. (2009). Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, *47*(1), 339-349.

Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *108*(D22).

Kaushal, S. S., Likens, G. E., Jaworski, N. A., Pace, M. L., Sides, A. M., Seekell, D., Belt, K. T., Secor, D. H., & Wingate, R. L. (2010). Rising stream and river temperatures in the United States. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *8*(9), 461-466.

Lamaro, A. A., Mariñelarena, A., Torrusio, S. E., & Sala, S. E. (2013). Water surface temperature estimation from Landsat 7 ETM+ thermal infrared data using the generalized single-channel method: Case study of Embalse del Río Tercero (Córdoba, Argentina). *Advances in Space Research*, *51*(3), 492-500.

Langford, T. (1990). *Ecological effects of thermal discharges: Springer Science & Business Media*.

Lardicci, C., Rossi, F., & Maltagliati, F. (1999). Detection of thermal pollution: Variability of benthic communities at two different spatial scales in an area influenced by a coastal power station. *Marine Pollution Bulletin*, *38*(4), 296-303.

Ma, P., Dai, X., Guo, Z., Wei, C., & Ma, W. (2017). Detection of thermal pollution from power plants on China's eastern coast using remote sensing data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *31*(8), 1957-1975.

Newman, S., Smith, J., Glew, M., Rogers, S., & Taylor, J. (2005). Temperature and salinity dependence of sea surface emissivity in the thermal infrared. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, *131*(610), 2539-2557.

Nowlin Jr, W. (1972). *Winter circulation pattern and property distributions. Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico, Vol. II, LRA Capurro and JL Reid, Eds*.

Oey, L., Ezer, T., & Lee, H. (2005). Loop Current, rings and related circulation in the Gulf of Mexico: A review of numerical models and future challenges. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, *161*, 31.

Politi, E., Cutler, M. E., & Rowan, J. S. (2012). Using the NOAA Advanced Very High-Resolution Radiometer to characterise temporal and spatial trends in water temperature of large European lakes. *Remote sensing of environment*, *126*, 1-11.

Preston, B. L. (2004). Observed winter warming of the Chesapeake Bay estuary (1949–2002): Implications for ecosystem management. *Environmental Management*, *34*(1), 125-139.

Ramírez-León, H., Couder-Castaneda, C., Herrera-Díaz, I., & Barrios-Pina, H. (2013). Modelación numérica de la descarga térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, *29*(2), 114-121.

Salehi, M. (2017). Thermal recirculation modeling for power plants in an estuarine environment. *Journal of Marine Science and Engineering*, *5*(1), 5.

Salgueiro, D., de Pablo, H., Nevesa, R., & Mateus, M. (2015). Modelling the thermal effluent of a near coast power plant (Sines, Portugal). *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, *15*(4).

Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of environment*, *90*(4), 434-440.

Suryaman, D., Asvaliantina, V., Nugroho, S., & Kongko, W. (2012). *Cooling water recirculation modeling of Cilacap Power Plant*. 12-13.

Takeshige, A., Takahashi, T., Nakata, H., & Kimura, S. (2013). Long-term trends in sea surface temperature in coastal water in relation to large-scale climate change: A case study in Omura Bay, Japan. *Continental Shelf Research*, *66*, 73-82.

Tan, J., & Cherkauer, K. A. (2013). Assessing stream temperature variation in the Pacific Northwest using airborne thermal infrared remote sensing. *Journal of environmental management*, *115*, 206-216.

Tang, D., Kester, D. R., Wang, Z., Lian, J., & Kawamura, H. (2003). AVHRR satellite remote sensing and shipboard measurements of the thermal plume from the Daya Bay, nuclear power station, China. *Remote Sensing of Environment*, *84*(4), 506-515.

Thomas, A., Byrne, D., & Weatherbee, R. (2002). Coastal sea surface temperature variability from Landsat infrared data. *Remote Sensing of Environment*, *81*(2-3), 262-272.

Trinh, R. C., Fichot, C. G., Gierach, M. M., Holt, B., Malakar, N. K., Hulley, G., & Smith, J. (2017). Application of Landsat 8 for monitoring impacts of wastewater discharge on coastal water quality. *Frontiers in Marine Science*, *4*, 329.

Vázquez-Botello, V., Rojas, G., Benitez, A., & Zárate, L. (1996). Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. *Universidad Autónoma de Campeche, EPOMEX y SEP. 672pp*.

Vukovich, F. M., & Crissman, B. W. (1986). Aspects of warm rings in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *91*(C2), 2645-2660.

Wan, Z. (2014). New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product. *Remote sensing of Environment*, *140*, 36-45.

Wang, F., Qin, Z., Song, C., Tu, L., Karnieli, A., & Zhao, S. (2015). An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data. *Remote Sensing*, *7*(4), 4268-4289.

Wloczyk, C., Richter, R., Borg, E., & Neubert, W. (2006). Sea and lake surface temperature retrieval from Landsat thermal data in Northern Germany. *International Journal of Remote Sensing*, *27*(12), 2489-2502.

Wukelic, G., Gibbons, D., Martucci, L., & Foote, H. (1989). Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper thermal band. *Remote sensing of environment*, *28*, 339-347.

Yu, X., Guo, X., & Wu, Z. (2014). Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS-Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. *Remote Sensing*, *6*(10), 9829-9852.

Zhang, Z., He, G., Wang, M., Long, T., Wang, G., Zhang, X., & Jiao, W. (2016). Towards an operational method for land surface temperature retrieval from Landsat 8 data. *Remote sensing letters*, *7*(3), 279-288.

11. ANEXOS

Anexo 1. Imágenes obtenidas del satélite Landsat-8 en el período 2013-2019.

Año	Fecha	Hora de Observación Landsat 8	Path	Row
2013	22.05	11:49:17	24	46
	7.06	11:49:16		46
	23.06	11:49:10		46
	9.07	11:49:14		46
	25.07	11:49:13		46
	13.10	11:49:31		47
2014	1.01	11:48:38	24	46
	2.02	11:48:17		46
	18.02	11:48:04		46
	6.03	11:47:49		46
	22.03	11:47:37		46
	23.04	11:47:07		46
	28.07	11:47:10		46
	13.08	11:47:18		46
	29.08	11:47:19		46
	3.12	11:47:25		46
	19.12	11:47:22		46
2015	29.06	11:46:38	24	46
	15.07	11:46:48		46
	31.07	11:47:16		47
	17.09	11:47:12		46
	3.10	11:47:16		46
	4.11	11:47:22		46
	6.12	11:47:22		46

2016	7.01	11:47:18	24	46
	23.01	11:47:20		46
	27.03	11:46:57		46
	12.04	11:47:15		47
	28.04	11:46:49		46
	14.05	11:46:47		46
	30.05	11:46:54		46
	1.07	11:47:06		46
	17.07	11:47:13		46
	18.08	11:47:20		46
	19.09	11:47:29		46
	5.10	11:47:31		46
	21.10	11:47:35		46
	6.11	11:47:35		46
	22.11	11:47:35		46
	8.12	11:47:33		46
	24.12	11:47:29		46
2017	25.01	11:47:20	24	46
	26.02	11:47:07		46
	30.03	11:46:50		46
	15.04	11:46:42		46
	1.05	11:46:31		46
	17.05	11:46:42		46
	18.06	11:46:58		46
	4.07	11:47:02		46
	8.10	11:47:31		46
	25.11	11:47:25		46

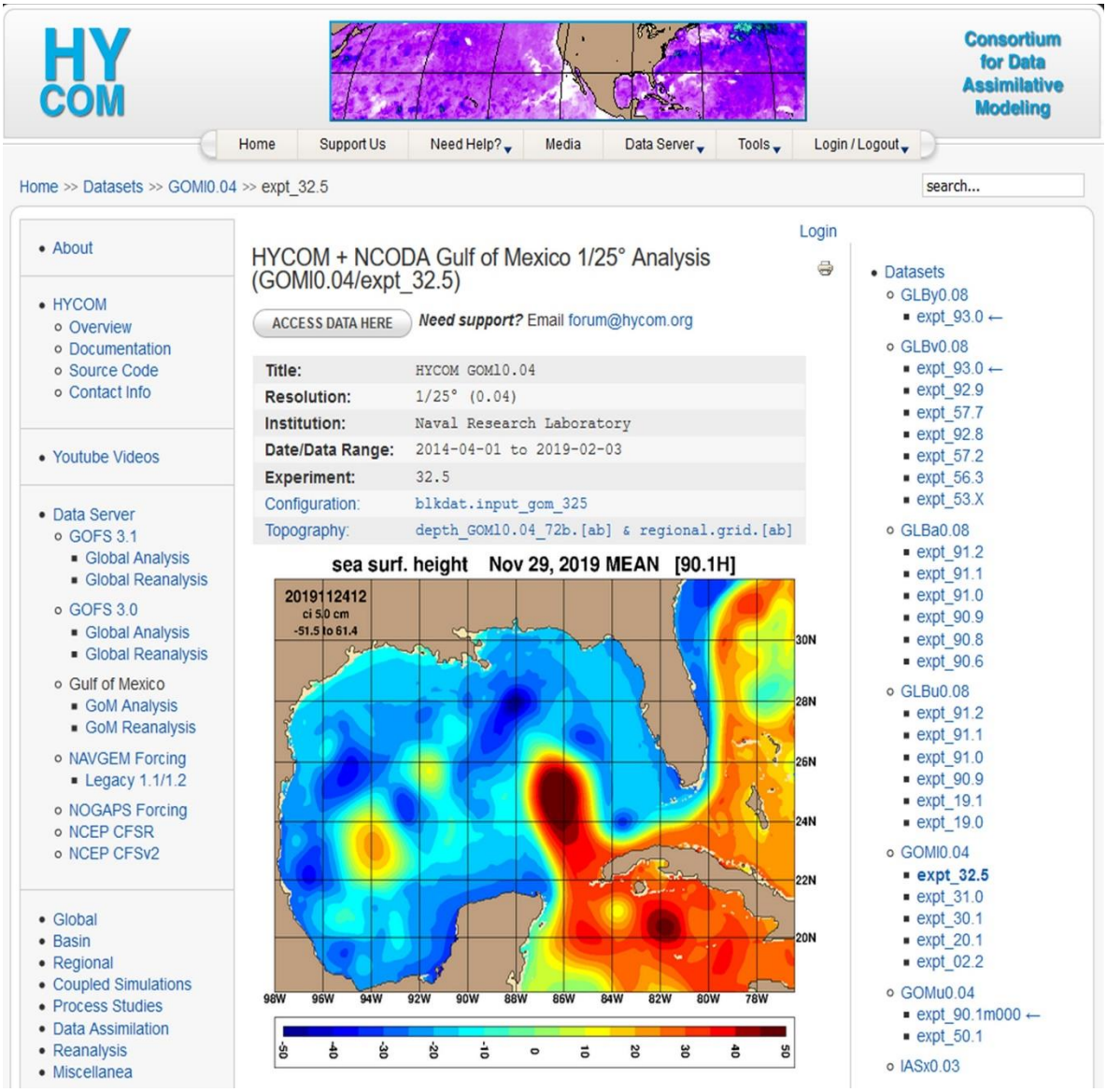
2018	1.03	11:46:57	24	46
	17.03	11:46:47		46
	2.04	11:46:41		46
	18.04	11:46:31		46
	4.05	11:46:23		46
	20.05	11:46:11		46
	5.06	11:46:01		46
	21.06	11:46:36		47
	23.07	11:46:28		46
	8.08	11:46:37		46
	24.08	11:46:45		46
	9.09	11:46:51		46
	25.09	11:46:56		46
	12.11	11:47:11		46
	14.12	11:47:07		46
	30.12	11:47:07		46

2019	31.01	11:47:01	24	46
	16.02	11:46:59		46
	5.04	11:46:46		46
	21.04	11:46:39		46
	7.05	11:46:44		46
	23.05	11:46:54		46
	8.06	11:47:02		46
	24.06	11:47:07		46
	10.07	11:47:11		46

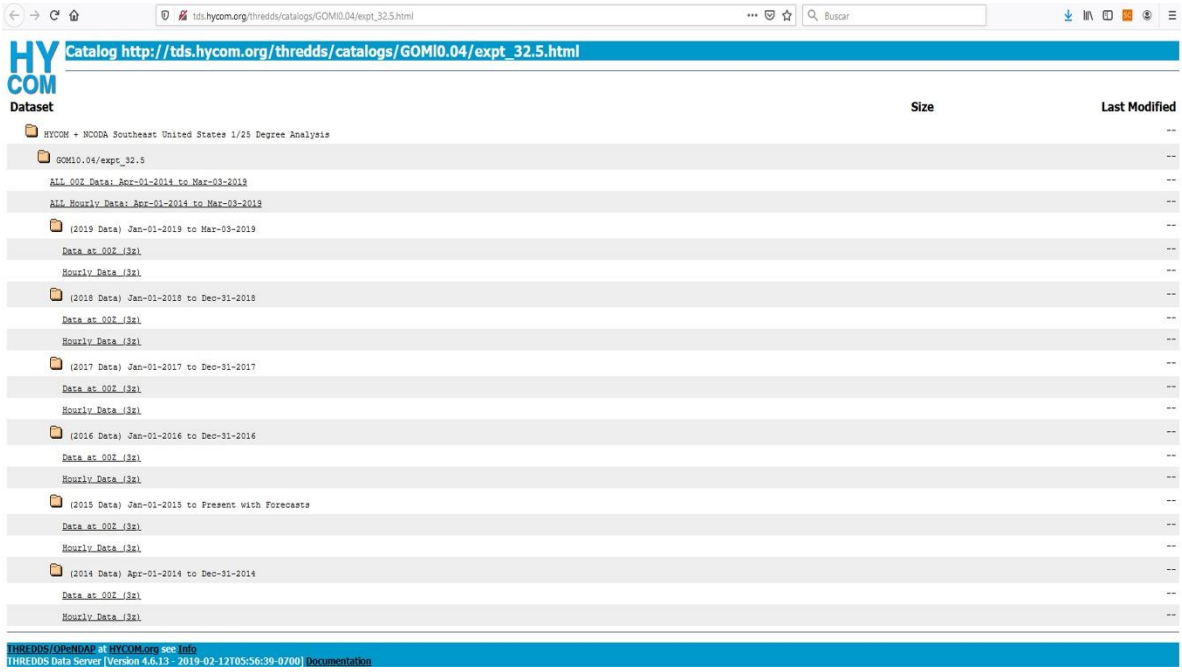
Anexo 2. Sondas proporcionadas por la SEMAR utilizadas como datos in situ en la validación.

Sonda	Fecha	Hora de medición (GMT)	Latitud	Longitud	T (°C)
1	12/05/2018	11:05	19.784	-96.4	26.0061
2	12/05/2018	12:00	19.8	-96.3	27.0581
3	12/05/2018	13:02	19.8	-96.2	27.3794
4	12/05/2018	13:50	19.784	-96.084	27.5146
5	12/05/2018	10:00	19.7	-96.367	27.0038
6	12/05/2018	09:12	19.7	-96.284	27.0206
7	12/05/2018	07:45	19.8	-96.2	26.8923
8	12/05/2018	06:36	19.7	-96.1	26.7234
9	11/05/2018	23:17	19.584	-96.284	27.1744
10	12/05/2018	00:33	19.6	-96.2	26.8913
11	12/05/2018	02:00	19.6	-96.1	27.0897
12	12/05/2018	03:26	19.6	-95.984	27.0385
13	12/05/2018	04:33	19.6	-95.884	27.1532
14	11/05/2018	22:07	19.5	-96.267	27.2898
15	11/05/2018	21:02	19.5	-96.184	27.0242
16	11/05/2018	19:57	19.5	-96.084	27.1609
17	11/05/2018	18:46	19.5	-96	27.313
18	11/05/2018	17:50	19.484	-95.9	27.4135
19	11/05/2018	09:30	19.4	-96.25	26.9019
20	11/05/2018	10:29	19.4	-96.2	26.9135
21	11/05/2018	11:41	19.4	-96.1	27.3316
22	11/05/2018	13:00	19.384	-96.017	27.1325
23	11/05/2018	14:28	19.4	-95.9	27.6072
24	11/05/2018	16:20	19.4	-95.784	27.8811
25	11/05/2018	08:10	19.3	-96.184	26.8257
26	11/05/2018	07:07	19.284	-96.1	26.8432
27	11/05/2018	05:50	19.284	-96	27.2982
28	11/05/2018	04:30	19.284	-95.9	26.7833
29	11/05/2018	03:25	19.284	-95.8	26.7955
30	11/05/2018	01:30	19.3	-95.684	26.9744
31	10/05/2018	13:05	19.2	-96	27.419
32	10/05/2018	12:52	19.184	-95.9	27.102
33	10/05/2018	09:40	19.184	-95.7	26.5771
34	10/05/2018	08:01	19.1	-95.684	26.6432
35	10/05/2018	05:40	19	-95.884	27.4311
36	10/05/2018	03:32	19	-95.8	27.0575
37	10/05/2018	02:00	19	-95.7	27.168
38	09/05/2018	19:11	18.9	-95.867	27.5572
39	09/05/2018	18:06	18.884	-95.784	27.6923
40	09/05/2018	17:01	18.9	-95.7	27.9263

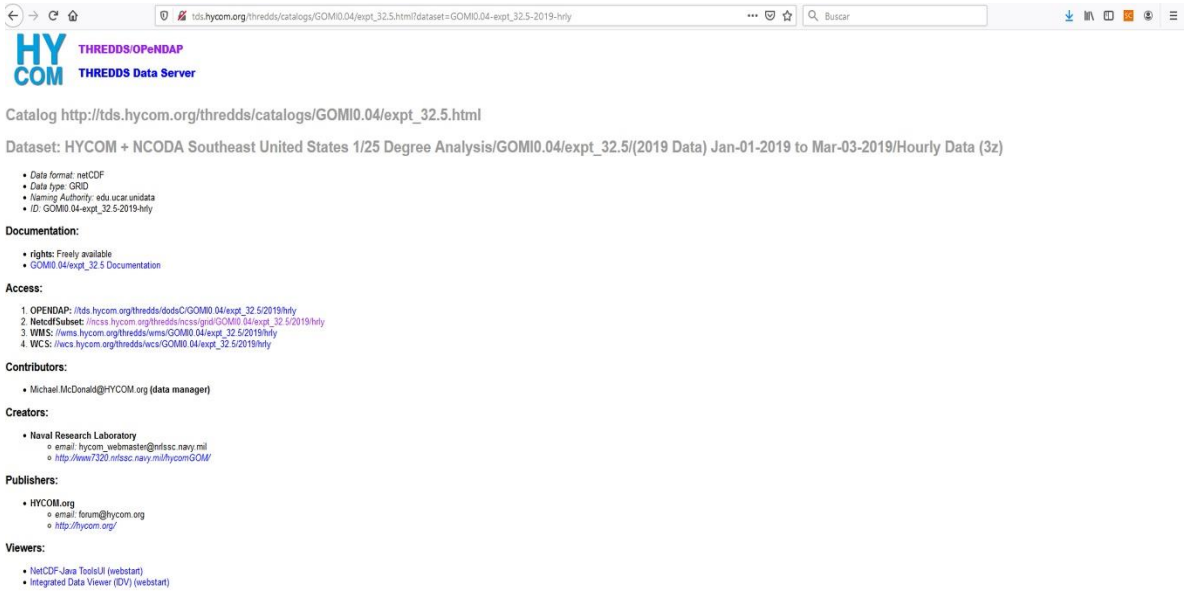
Anexo 3. Página del Consorcio HYCOM para el Golfo de México.



Anexo 4. Catálogo de información del Consorcio HYCOM para el Golfo de México.



Anexo 5. Enlace del catálogo de información del Consorcio HYCOM para el Golfo de México, año 2019.



tds.hycom.org/thredds/catalogs/GOMl0.04/expt_32.5.html?dataset=GOMl0.04-expt_32.5-2019-hrly

Buscar

HYCOM

THREDDS/OPeNDAP

THREDDS Data Server

Catalog http://tds.hycom.org/thredds/catalogs/GOMl0.04/expt_32.5.html

Dataset: HYCOM + NCODA Southeast United States 1/25 Degree Analysis/GOMl0.04/expt_32.5/(2019 Data) Jan-01-2019 to Mar-03-2019/Hourly Data (3z)

- *Data format*: netCDF
- *Data type*: GRID
- *Naming Authority*: edu.ucar.unidata
- *ID*: GOMl0.04-expt_32.5-2019-hrly

Documentation:

- **rights:** Freely available
- GOMl0.04/expt_32.5 Documentation

Access:

1. **OPENDAP:** //tds.hycom.org/thredds/dodsC/GOMl0.04/expt_32.5/2019/hrly
2. **NetcdfSubset:** //ncss.hycom.org/thredds/ncss/grid/GOMl0.04/expt_32.5/2019/hrly
3. **WMS:** //wms.hycom.org/thredds/wms/GOMl0.04/expt_32.5/2019/hrly
4. **WCS:** //wcs.hycom.org/thredds/wcs/GOMl0.04/expt_32.5/2019/hrly

Contributors:

- Michael.McDonald@HYCOM.org **(data manager)**

Creators:

- **Naval Research Laboratory**
  - *email*: hycom_webmaster@nrlssc.navy.mil
  - *http://www7320.nrlssc.navy.mil/hycomGOM/*

Publishers:

- **HYCOM.org**
  - *email*: forum@hycom.org
  - *http://hycom.org/*

Viewers:

- NetCDF-Java ToolsUI (webstart)
- Integrated Data Viewer (IDV) (webstart)