



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

**TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA ARENA EN ÁREAS
DE ANIDACIÓN DE TORTUGAS MARINAS MEDIANTE
TELEDETECCIÓN.**

T E S I S

Que para obtener el grado de

Maestra en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación en Ecología de Zonas Áridas)

P r e s e n t a

Marina Lizbeth Jiménez Jiménez

La Paz, Baja California Sur, agosto de 2023.

ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 13 horas del día 04 del mes de julio de 2023, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

"Temperatura superficial de la arena en áreas de anidación de tortugas marinas mediante teledetección"

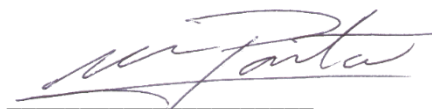
Presentada por la alumna:

Marina Lizbeth Jiménez Jiménez

Aspirante al Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN **Ecología de Zonas Áridas**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA



Dr. Miguel Ángel Porta Gándara
Co-Director de Tesis



Dra. Sarahi Sandoval Espinoza
Co-Directora de Tesis



Dr. Gustavo Alberto Arnaud Franco
Co-Tutor de Tesis



Dra. Alejandra Nieto Garibay
Directora de Estudios de Posgrado y
Formación de Recursos Humanos.

La Paz, Baja California Sur, a 04 de julio de 2023.

Los miembros del comité de tesis del (la) estudiante Marina Lizbeth Jiménez Jiménez del Programa de Maestría en Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales, revisamos el contenido de la tesis y otorgamos el Vo. Bo. dado que la tesis no representa un plagio de otro documento como lo muestra el reporte de similitud realizado:

- Herramienta antiplagio:
iThenticate
- Filtros utilizados:
Excluir citas.
Excluir bibliografía.
Excluir fuentes y coincidencias menores a 10 palabras.
- Porcentajes de similitud:
13%
Se muestra captura de pantalla

Citas excluidas		13%
Bibliografía excluida		
Resumen de Coincidencias		
1	Internet 428 palabras Copiado el 15-Jun-2022 cibnor.repositorioinstitucional.mx	2%
2	Internet 152 palabras hdl.handle.net	1%
3	Internet 146 palabras Copiado el 28-Mar-2023 www.seiper.org.mx	1%
4	Internet 143 palabras Copiado el 22-Feb-2021 www.biblioteca.cicimar.ipn.mx	1%
5	Internet 140 palabras Copiado el 13-Dic-2020 doku.pub	1%
6	Internet 96 palabras Copiado el 04-Dic-2020 www.researchgate.net	<1%
7	Internet 66 palabras Copiado el 23-Abr-2023 repositorio.uileam.edu.ec	<1%

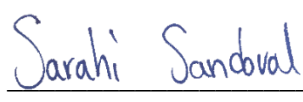
Firmas del comité



Dr. Miguel Ángel Porta Gándara
Co-Director de Tesis



Dr. Gustavo Alberto Arnaud Franco
Co-Tutor de Tesis



Dra. Sarahi Sandoval Espinoza
Co-Directora de Tesis

Conformación de Comités

Comité tutorial

Dr. Miguel Ángel Porta Gándara
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Co-Director de Tesis

Dra. Sarahi Sandoval Espinoza
CONACYT-Instituto Politécnico Nacional
Co-Directora de Tesis

Dr. Gustavo Alberto Arnaud Franco
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Co-Tutor de tesis

Comité Revisor de Tesis

Dr. Miguel Ángel Porta Gándara
Dra. Sarahi Sandoval Espinoza
Dr. Gustavo Alberto Arnaud Franco

Jurado de Examen

Dr. Miguel Ángel Porta Gándara
Dra. Sarahi Sandoval Espinoza
Dr. Gustavo Alberto Arnaud Franco

Suplente

Dr. Joaquín Gutiérrez Jagüey

Resumen

El uso de técnicas de teledetección se ha convertido en una valiosa herramienta para el monitoreo de los recursos naturales ya que permiten evaluar grandes extensiones de terrenos y zonas remotas o inaccesibles casi en tiempo real, y es de bajo costo. Por medio de los sensores remotos es posible estimar la temperatura de la superficie terrestre sin necesidad de tener contacto directo con los objetos, gracias al desarrollo y uso de tecnología infrarroja térmica en satélites artificiales. Los métodos tradicionales *in situ* son costosos y no cubren grandes extensiones de terreno, además no es posible tener registros de la temperatura del pasado. El aumento de la temperatura global representa una amenaza importante para la biodiversidad mundial, por ejemplo, en las tortugas marinas la temperatura de la arena influye en el desarrollo embrionario, el periodo de incubación y determina el sexo de las crías. Actualmente, la temperatura en algunas playas de anidación de tortugas marinas supera los rangos de la temperatura de incubación óptimos (25–35 °C), por lo que en esta tesis se analizó espacial y temporalmente la temperatura superficial de la arena en el área de anidación de tortugas marinas del Campamento Tortuguero Playa Ceuta, Sinaloa, México mediante teledetección y sensores digitales *in situ*. Se utilizaron imágenes de los satélites Landsat 5 TM y 8 OLI de los meses julio-diciembre de los años 1993 al 2021, que cubren la temporada de anidación de tortugas marinas. Y se analizó la temperatura ambiental obtenida mediante sensores *in situ* de los años 2009, 2010, 2019 y 2020. Se encontró que la temperatura superficial de la arena tuvo una tendencia de aumento en las últimas tres décadas para todos los meses analizados, superando los 30 °C, excepto para el mes de diciembre. Los registros de la temperatura ambiental *in situ* mostraron que la temperatura a inicios y fin de la temporada de anidación se encuentran fuera del rango de incubación óptimo, esta osciló entre los 8.4 y 39.4 °C, por lo que se esperaría una alta mortalidad de las crías. Los años con los valores más altos de temperatura ambiental fueron 2009 y 2019, por lo tanto, se espera una proporción sexual sesgada hacia hembras desde el mes de julio hasta mediados de octubre para todas las temporadas analizadas. La validación de la temperatura superficial de la arena vs los registros *in situ* confirman que la teledetección es una herramienta útil para conocer las tendencias de las temperaturas de la arena en áreas de anidación de tortugas marinas. Se propone una zonificación del área de anidación de acuerdo con los valores de temperatura superficial en los últimos tres años, donde se muestran las zonas óptimas para el desarrollo embrionario.

Palabras clave: Temperatura superficial de la arena, teledetección, Landsat, tortugas marinas.

ORCID: 0009-0007-4435-8580

Vo. Bo.



Dr. Miguel Ángel Porta Gándara
Co-Director de tesis

Vo. Bo.



Dra. Sarahi Sandoval Espinoza
Co-Directora de tesis

Summary

Remote sensing techniques have become a valuable tool for monitoring natural resources, since they enable large areas of land and remote or inaccessible areas to be evaluated in almost real time and at low cost. Remote sensors make it possible to estimate the temperature of the earth's surface without the need for direct contact with the objects observed, thanks to the development and use of thermal infrared technology in artificial satellites. Traditional *in situ* methods are expensive, do not cover large areas of land, and do not provide records of past temperatures. For sea turtles, the temperature of the sand influences embryonic development and the incubation period and determines the sex of hatchlings. Currently, the temperature on some sea turtle nesting beaches exceeds the optimal incubation temperature range (25–35 °C). In this thesis, the sand surface temperature was measured spatially and temporally in the sea turtle nesting area of the Campamento Tortuguero Playa Ceuta, Sinaloa, Mexico using remote sensing and *in situ* data loggers. Images from Landsat 5 TM and 8 OLI satellites from July to December 1993 to 2021, covering the sea turtle nesting season, were used. *In situ* ambient temperature from 2009, 2010, 2019, and 2020 was also analyzed. It was found that the sand surface temperature showed an increasing trend over the last three decades for all months, exceeding 30 °C except for December. *In situ* ambient temperature records showed that the temperature at the beginning and end of the nesting season is outside the optimal incubation range, ranging from 8.4 to 39.4 °C, so high hatchling mortality would be expected. The years with the highest ambient temperature values were 2009 and 2019. A sex ratio biased towards females is expected from July to mid-October for all seasons analyzed. Validation of surface sand temperature *vs.* *in situ* records confirm that remote sensing is a useful tool to understand trends in sand temperatures in sea turtle nesting areas. A zoning of the nesting area is proposed according to surface temperature values over the last three years, showing the optimal zones for sea turtle embryonic development.

Keywords: Sand surface temperature, remote sensing, Landsat, sea turtles.

ORCID: 0009-0007-4435-8580

Vo. Bo.



Dr. Miguel Ángel Porta Gándara
Co-Director de tesis

Vo. Bo.



Dra. Sarahi Sandoval Espinoza
Co-Directora de tesis

Dedicatoria

Pequeña tortuga
tienes que llegar a tu destino,
avanza despacio y sigue a la luna
quien te guiará en tu camino.

No te detengas con la luz blanca
que te quiere engañar,
ni escuches esos extraños ruidos
sólo te desorientarán,
te pido no los confundas,
buena suerte y sigue tu camino.

Espérame allá,
cuando tú llegues,
te aluzará la luna
en compañía del mar.

-Mayela Escobar González

Para esa pequeña niña, a la que estoy rescatando,
que nunca imaginó que su pasión por las tortugas la llevaría tan lejos.

Y para todas esas niñas que hoy sueñan grandes cosas,
no dejen de trabajar y luchar por sus sueños,
les esperan cosas inmensas.

Agradecimientos

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada (CVU 1143006) para la realización de esta maestría.

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C. (CIBNOR) por permitirme realizar mi maestría, así como a la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos por las facilidades brindadas, el apoyo en trámites y seguimiento del programa.

A los miembros de mi comité tutorial, porque con sus distintas personalidades, formas de analizar las cosas, sus consejos y comentarios enriquecieron mi trabajo, además, me aportaron mucho personal, académica y profesionalmente. Muchas gracias, Dra. Sarahi Sandoval Espinoza, Dr. Miguel Ángel Porta Gándara y Dr. Gustavo Alberto Arnaud Franco.

Agradezco al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Durango (CIIDIR-IPN Durango) por permitirme realizar mi estancia en la institución y por el apoyo en las áreas pertinentes. En especial gracias a los miembros del Laboratorio de Fauna Silvestre por el apoyo, el compañerismo, las buenas charlas y todas las anécdotas que llevaré siempre conmigo, los aprecio y admiro mucho: Dra. Celia López González, Dr. Uriel Hernández Salinas, Ing. Alejandra Guerrero, Ing. Dulce Castañón, M. en C. Fernanda Rodríguez y M. en C. Diego García.

A la Biól. Exp. Teresa Salas Hernández, que me inspiró y acompañó en las angustias y en las alegrías durante nuestro proceso de maestría, gracias por el apoyo mientras estuve en Durango, gracias también a César, ambos estuvieron para apoyarme en todo momento.

A mi querido amigo, ahora Biól. Luis David López Vargas, por todo el apoyo y la amistad que formamos, espero poder seguir acompañándonos, crecer y compartir más logros.

Al Biól. Exp. Axel Trujillo, por el apoyo a distancia, por todas las veces que recibí sus porras y por compartir conmigo el amor por las tortugas, gracias también por tu labor tan maravillosa de proteger a las tortugas.

A mis compañeros de maestría, que en algún momento compartimos clases y pantalla, el mejor de los éxitos. Especialmente al pequeño grupo con el que compartí aventuras en mi estancia por La Paz, a: Biól. Fernanda Manríquez, L.G.B. Alexis Martínez, I.A.B. Alonso Padilla, L.G.B. Jesús Castro, Biól. Jocelyn Corzas y a la M.V.Z. Carmina Benítez.

A las personas que estuvieron pendientes de mí durante mi estancia en el Campamento Tortuguero Playa Ceuta: al Biol. Jesús Iván Guardado González, responsable del campamento, gracias también por proteger a las tortugas, y a María del Rosario Acosta Arreola, por recibirme en su casa y apoyarnos en las actividades del Campamento.

A la Psic. Refugio Castro Argüelles, por sus sabias palabras, por ayudarme a recuperarme, a reconocer cuán capaz y valiosa soy, tan capaz que logré este sueño.

A Eduardo García y Alejandro Beltrán, con quienes viví días increíbles durante mi estancia en La Paz, que hicieron el tiempo más llevadero, por el apoyo y compañía.

A mi familia, que desde la lejanía estuvo apoyándome como siempre. Gracias a mi madre, Norma, a mi hermano, Iván y especialmente, gracias a mi hermana, Laura, por inspirarme, motivarme y por ser un gran ejemplo para mí.

Y a todas esas personas que haya omitido, pero que fueron partícipes de este logro, que a la distancia me han dado aliento y fuerza para seguir.

GRACIAS INFINITAS.

Contenido

Resumen	i
Summary	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	vi
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	x
Glosario	xi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	4
2.1 Determinación sexual por temperatura (TSD).....	4
2.2 Temperatura de la arena en playas de anidación de tortugas marinas	7
2.3 Teledetección	11
2.3.1 Historia	11
2.3.2 Principios físicos de la teledetección	14
2.3.3 Espectro electromagnético	16
2.3.4 Componentes de un sistema de teledetección.....	17
2.3.5 Obtención de una imagen de satélite	18
2.4 Temperatura superficial terrestre (LST).....	19
2.4.1 Estimación de la LST	20
2.4.2 LST en diversos materiales	22
2.4.3 Estimación de la temperatura superficial de la arena	25
3. JUSTIFICACIÓN	27
4. HIPÓTESIS	28
5. OBJETIVOS	29
5.1 Objetivo general	29
5.2 Objetivos particulares	29
6. MATERIAL Y MÉTODOS	30
6.1 Área de estudio	30
6.2 Temperatura superficial de la arena	32
6.2.1 Acervo de imágenes de satélite	32
6.2.2 Estimación de temperatura superficial de la arena	34
6.3 Temperatura ambiental <i>in situ</i>	37
6.4 Comparación de datos satelitales e <i>in situ</i>	38

6.5 Zonificación del área de estudio	39
6.6 Análisis estadísticos.....	40
7. RESULTADOS	42
7.1 Temperatura superficial de la arena	42
7.2 Temperatura ambiental <i>in situ</i>	47
7.3 Comparación de datos satelitales e <i>in situ</i>	49
7.4 Zonificación del área de estudio	52
7.5 Análisis estadísticos.....	53
7.5.1 Temperatura superficial de la arena	53
7.5.2 Temperatura ambiental <i>in situ</i>	54
7.5.3 Comparación de datos satelitales e <i>in situ</i>	55
8. DISCUSIÓN	56
9. CONCLUSIONES	63
9.1 Recomendaciones	64
10. LITERATURA CITADA	65
11. ANEXOS	74
ANEXO A	74
ANEXO B	75
ANEXO C	82
ANEXO D.....	84
ANEXO E	86
ANEXO F.....	90

Lista de figuras

Figura 1. Temperatura del aire en la superficie terrestre durante 1880-2020. Tomada de GISTEMP/NASA (2022).	1
Figura 2. Mecanismos de determinación sexual en vertebrados. Tomada de Ezaz <i>et al.</i> (2006).	5
Figura 3. Proporción sexual de crías en reptiles en función de la temperatura de incubación. Tomada de Ciofi y Swingland (1997).	6
Figura 4. Evolución histórica de los sistemas de Teledetección. Modificada de Chuvieco (2019).	14
Figura 5. Campos eléctrico y magnético de la onda electromagnética. Tomada de Tippens (2001).	15
Figura 6. Relación entre frecuencia y longitud de onda.	16
Figura 7. Regiones del espectro electromagnético. Tomada de Chuvieco (2019).	17
Figura 8. Elementos de un sistema de teledetección.	18
Figura 9. Región del infrarrojo en el espectro electromagnético.	20
Figura 10. Cambios en la temperatura de diversas cubiertas durante un día. Tomada de Short (1982).	25
Figura 11. Polígono de estudio en la zona de anidación del Campamento Tortuguero Playa Ceuta, Sinaloa.	30
Figura 12. Escena Landsat que cubre el área de estudio (Path:32; Row: 43).	33
Figura 13. Diagrama de flujo para estimar la LST con imágenes Landsat 5 TM.	37
Figura 14. Diagrama de flujo para estimar la LST con imágenes Landsat 8 OLI.	37
Figura 15. a) Sensor utilizado para medir la temperatura ambiental <i>in situ</i> (HOBO UA-001-08). b) Localización del sensor en el corral de incubación.	38
Figura 16. Píxeles que cubren el corral de incubación.	39
Figura 17. Distribución de la temperatura superficial de la arena (LST) del mes de julio del polígono de estudio, el círculo negro representa la ubicación del corral de incubación.	43
Figura 18. Diagramas de cajas y bigotes de la temperatura superficial de la arena del polígono de estudio. En cada caja los bordes inferior y superior representan los percentiles 25 y 75 respectivamente, la línea roja en el centro es la mediana. Los bigotes representan el valor mínimo y máximo de la serie de datos. Los valores atípicos se representan con el signo + en rojo. La línea negra punteada indica 30 °C.	46
Figura 19. Frecuencias de la temperatura superficial de la arena de los píxeles del polígono de estudio en el mes de julio.	47
Figura 20. Registros de temperatura ambiental obtenida mediante sensores <i>in situ</i> (Sandoval, 2012, 2020).	48
Figura 21. Promedios móviles de la temperatura ambiental <i>in situ</i> .	49
Figura 22. a) Ubicación de los píxeles que cubren el corral de incubación, b) Temperatura superficial de la tierra (LST) obtenida mediante imágenes de satélite.	49
Figura 23. Temperatura promedio obtenida de los píxeles que cubren el corral de incubación de los diferentes meses y años analizados. La línea azul punteada indica 30 °C.	50
Figura 24. Comparación de datos satelitales e <i>in situ</i> . Se muestran los valores de temperatura comparados y la precipitación diaria registrada por la estación meteorológica La Cruz (CONAGUA, 2022).	52
Figura 25. Mapas de zonificación del área de estudio de acuerdo con la temperatura superficial de la arena. En azul se muestran las zonas no viables con temperaturas por debajo de los 25 °C, en rojo las zonas no viables con temperaturas superiores a los 35 °C. El	

círculo negro representa la ubicación del corral de incubación del campamento tortuguero Playa Ceuta, Sin. 53

Figura 26. Área de anidación del campamento tortuguero Playa Ceuta, Sin. junto con la capa de uso de suelo y vegetación, Serie 7 (INEGI,2021). El cuadro en rojo indica los pixeles con LST de la arena por arriba de los 35 °C; el cuadro en azul pixeles con temperatura menor a 25 °C, obtenidos por imágenes de Landsat 8 de los años 2019, 2020 y 2021; el asterisco corresponde al corral de incubación..... 62

Lista de tablas

Tabla 1. Temperatura de incubación en tortugas marinas. Tomada de Wibbels (2003).	7
Tabla 2. Técnicas para estimar la emisividad de la superficie terrestre. Tomada de Martínez-Barbáchano (2020).	22
Tabla 3. Datos de adquisición de las imágenes de satélite utilizadas.	33
Tabla 4. Bandas espectrales de las imágenes Landsat utilizadas. Tomada de USGS (2022). ..	34
Tabla 5. Coeficientes radiométricos de las imágenes de satélite utilizados para estimar la LST.	36
Tabla 6. Número de imágenes de satélite utilizadas.	42
Tabla 7. Fecha de las imágenes utilizadas para la comparación de datos de temperatura. ...	51
Tabla 8. Resultados del análisis ANOVA ($p < 0.05$) de los valores de temperatura superficial de la arena por mes.	53
Tabla 9. Resultados del análisis ANOVA ($p < 0.05$) de valores de temperatura ambiental <i>in situ</i> por mes.	54
Tabla 10. Parámetros estadísticos de la comparación de la temperatura ambiental <i>in situ</i> ($T_{in situ}$) y la temperatura superficial de la arena obtenida mediante imágenes de satélite (T_{sat}).	55

Glosario

Albedo: Proporción entre la radiación que incide en una superficie y la que es reflejada. Representa la reflectividad de la superficie.

Banda espectral: Canal de adquisición de datos de un sistema sensor correspondiente a un intervalo de longitud de onda específico dentro del espectro electromagnético.

Bit: Palabra inglesa (del acrónimo *binary digit*) que se utiliza para denominar a la unidad mínima de información usada en informática, se expresa como un valor de acuerdo con el sistema de numeración binario, con valores de 0 y 1.

Calor: Energía que fluye de un objeto a otro debido a la diferencia de temperatura entre ellos, o entre un sistema y su entorno debido a un gradiente de temperatura.

Conducción: Transferencia de energía entre objetos por el contacto directo o a través de un material por la interacción entre sus moléculas.

Conductividad térmica: Propiedad de un material para transferir energía cinética entre sus moléculas o a otras sustancias con las que está en contacto.

Corral de incubación: Área de una playa de incubación protegida para evitar el ingreso de depredadores, donde se reubican los nidos de tortugas marinas.

Cuanto: (Del latín *quantum*, que significa cantidad). Unidad de energía emitida mediante radiación electromagnética.

Cuerpo negro: objeto que teóricamente capaz de absorber toda la energía electromagnética que incide sobre él, lo que produce agitación de sus partículas y, en consecuencia, la emisión de radiación térmica.

Determinación sexual: Evento molecular, durante etapas tempranas del desarrollo embrionario, mediante el cual se define el sexo de un individuo.

Emisividad: Proporción de la energía que puede ser emitida por un objeto en relación con la que un cuerpo negro emitiría a la misma temperatura.

Espectro electromagnético: Conjunto de todas las ondas electromagnéticas ordenadas de forma continua según su frecuencia o longitud de onda.

Firma espectral: Comportamiento de una superficie u objeto específico al recibir radiación, considerando la cantidad de energía reflejada, absorbida y transmitida.

Incubación: Mantenimiento de los huevos puestos por un animal a determinada temperatura, por medios naturales o artificiales, para que se desarrollen los embriones.

Inercia térmica: Resistencia de un objeto a ser calentado o enfriado.

Longitud de onda: Medida de la distancia horizontal entre dos valores culminantes entre ondas sucesivas, es decir, la distancia entre dos crestas o valles consecutivos de la onda.

Nivel digital: Valor entero que expresa de forma numérica la intensidad radiométrica percibida por un sensor óptico-electrónico para determinada superficie terrestre, en una banda espectral.

Píxel: Menor elemento pictórico de una imagen digital que es susceptible a ser procesado.

Proporción sexual: Razón entre el número de hembras y machos en una población.

Radiación: Forma de propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas.

Radiación electromagnética: Energía propagada a través del espacio y recibida por nuestro planeta, proveniente del Sol.

Radiación térmica: Energía propagada por un objeto debido a su temperatura, producto del movimiento térmico de sus partículas.

Satélite: Objeto construido por el ser humano para orbitar un cuerpo celeste que tiene como objetivo trasladar equipamientos que permiten recoger y transmitir información a la Tierra.

Sensor: Instrumento que detecta una magnitud y para presentarla en forma susceptible de ser aprovechada la convierte en una señal eléctrica.

Temperatura: Magnitud que expresa la energía cinética de las partículas de un objeto, esta aumenta de acuerdo con la velocidad de sus partículas.

Temperatura ambiental: Energía térmica percibida por un termómetro o sensor que representa la temperatura del aire de un lugar en momento definido, así como la radiación térmica de la superficie de los objetos circundantes.

Temperatura superficial del aire: Temperatura medida a 2 metros de distancia de la superficie del suelo.

1. INTRODUCCIÓN

La temperatura del aire en la superficie terrestre se ha registrado desde el siglo pasado, los datos han provenído de récords meteorológicos mundiales publicados por el Instituto Smithsoniano, por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) y por Centro de Investigaciones Atmosféricas (NCAR) (Hansen y Lebedeff, 1987). Los registros han indicado que la temperatura del aire aumentó a partir de los años 80's medio grado centígrado, la temperatura para los años 2000 aumentó un grado centígrado y para el año 2020 se ha registrado un aumento de 1.5 grados más que en los años 60 y 70's (Hansen *et al.*, 2006; Fig. 1).

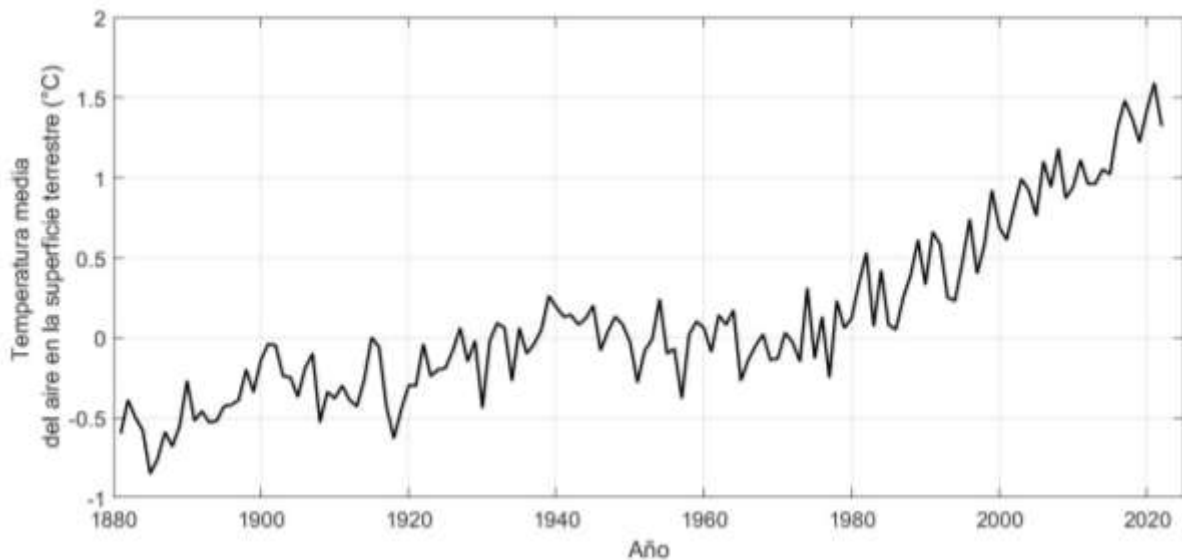


Figura 1. Temperatura del aire en la superficie terrestre durante 1880-2020. Tomada de GISTEMP/NASA (2022).

El aumento de la temperatura ha sido atribuido a causas naturales, así como antropogénicas, entre las naturales se tiene la variabilidad de irradiación solar y los gases resultantes de las erupciones volcánicas (Robock, 2000; Solanki *et al.*, 2013); entre las causas antropogénicas se encuentra la emisión y el aumento de las partículas de azufre y los gases de efecto invernadero, producidos por el uso de combustibles fósiles (Tett *et al.*, 1999).

Actualmente, el uso de técnicas de teledetección ha permitido estimar la temperatura de la superficie terrestre (LST), con la virtud de la obtención información de los objetos en la superficie sin necesidad de tener contacto directo con estos, gracias al uso y desarrollo de tecnología infrarroja térmica en los satélites artificiales con fines ambientales

(Chuvienco, 2019). De esta manera, se pueden evaluar grandes extensiones de terreno en zonas remotas o inaccesibles, con información en tiempo real y a bajo costo, contrario a las mediciones convencionales *in situ*, las cuales son muy costosas y no se puede obtener información del pasado (Wulder, 1998).

Entre los satélites lanzados por los Estados Unidos por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) que han sido utilizados para estimar la temperatura de la superficie terrestre, se tiene al satélite meteorológico TIROS-II, lanzado en noviembre de 1960 (Wark *et al.*, 1962). Posteriormente, se utilizaron los satélites del programa Nimbus (1964-1978), HCMM (1978-1981), Seasat (1978) y Landsat (1972-2022). Por parte de la Unión Soviética se tiene el satélite Almaz (1973-1990), por la Agencia Espacial Europea los SPOT (1986-2015), por la Agencia Nacional de Desarrollo Espacial de Japón, MOS (1987-1996) y por la Agencia India de Investigación Espacial, el programa IRS (1988-2022) (Chuvienco, 1992; 2019).

Dado que la temperatura es una variable crucial en muchos procesos biológicos, el aumento en la temperatura global puede afectar la fisiología, la fenología y el comportamiento de las especies y como consecuencia, provocar cambios en su distribución geográfica (Kappelle *et al.*, 1999; Román-Palacios y Wiens, 2020). Se ha documentado que algunos animales tienden a desplazarse hacia zonas más frías, dirigiéndose hacia los polos o zonas más altas por ejemplo, pequeños mamíferos se están desplazando hacia el norte en EE. UU. (Davis y Callahan, 1992), las aves están cambiando sus zonas de anidación en función de la temperatura, así como la puesta de huevos se está presentando de forma temprana en algunas especies, mientras que en otras se está retardando (Crick *et al.*, 1997; Brown *et al.*, 1999; Crick y Sparks, 1999; Thomas y Lennon, 1999) o adelantando la fecha de la puesta de los huevos en distintas especies de anfibios (Beebee, 1995).

También algunos reptiles se ven afectados por el aumento de la temperatura durante la incubación de sus huevos, por ejemplo, en los cocodrilos se ha demostrado que hay variaciones importantes en la pigmentación y tamaño de las crías cuando la temperatura de incubación aumenta, lo que representa una consecuencia negativa al defenderse de depredadores, además en especies como *Alligator mississippiensis*, se produce mayor cantidad de machos (Ferguson y Joanen, 1982; Murray *et al.*, 1990).

Existen siete especies de tortugas marinas en el mundo y seis anidan en playas mexicanas, todas se encuentran consideradas en peligro de extinción por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN), clasificadas como especies vulnerables, en peligro o en peligro crítico, además de estar catalogadas dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010 para su protección y conservación (Gaona y Barragán, 2016; IUCN, 2021).

En México, en el año 1986 se decretaron las primeras zonas de reserva y refugio de tortugas marinas, a través de los campamentos tortugueros ubicados en playas del Golfo de México, mar Caribe y del Pacífico, se implementan actividades como: la vigilancia de las zonas de anidación, la protección y monitoreo de las hembras anidadoras, la siembra de huevos en corrales de incubación y la liberación de crías (CONANP, 2018a; DOF, 1986).

En las tortugas marinas, la temperatura de incubación influye en el desarrollo y supervivencia embrionaria, determina la duración del periodo de incubación y define el sexo de las crías, se ha reportado la incubación a temperaturas bajas produce machos mientras que temperaturas altas producen hembras (Yntema y Mrosovsky, 1980; Monsinjon *et al.*, 2019).

Para conocer la temperatura en las áreas de anidación se utilizan termómetros o sensores digitales *in situ*, actualmente, se ha reportado que la temperatura en algunas playas de anidación de tortugas marinas supera el rango óptimo para el desarrollo de los embriones (25-35 °C) (Ackerman, 1997; Howard *et al.*, 2014; Tanabe *et al.*, 2020). Sin embargo, utilizar sensores *in situ* resulta costoso, además que los sensores pueden perderse tras el paso de desastres naturales y es casi imposible abarcar grandes extensiones de terreno (Parra *et al.*, 2006; Laloë *et al.*, 2016).

Por lo que conocer la temperatura superficial de la arena de las áreas de anidación de tortugas marinas mediante técnicas de teledetección, resultaría una técnica más eficiente y menos costosa, por ello se propone la utilización de imágenes de los satélites del programa Landsat debido a que cuentan con sensores térmicos que permiten estimar temperatura y por la disponibilidad de imágenes de satélite desde los años 80's (Aryal *et al.*, 2021), lo que permitirá conocer la tendencia de la temperatura en la arena de las últimas décadas y esta información será útil en la elaboración de planes de manejo para la conservación de tortugas marinas.

2. ANTECEDENTES

2.1 Determinación sexual por temperatura (TSD)

Se conocen dos mecanismos de determinación sexual en animales: la determinación sexual genotípica (GSD, por sus siglas en inglés) se caracteriza por la presencia de cromosomas y genes que definen el sexo del individuo (Bull, 1980; Pieau, 1996). La presencia de cromosomas sexuales en vertebrados se agrupa en dos sistemas: el sistema XY, característico de los mamíferos y algunas especies de reptiles, por ejemplo, tortugas del género *Staurotypus*, así como *Siebenrockiella* (Bull *et al.*, 1974; Bull, 1980; Carr y Bickham, 1981) y el sistema ZW que presentan aves y algunas especies de peces, anfibios y reptiles como serpientes, lagartijas y tortugas (Ezaz *et al.*, 2006; Fig. 2).

Por otro lado, algunos organismos presentan determinación sexual ambiental, donde el sexo de un individuo se determina después de la fecundación debido a la variación de factores como el pH, salinidad, fotoperiodo o la temperatura (Rodríguez-Pulido *et al.*, 2018). En algunos reptiles, la temperatura de incubación de los huevos determina la proporción sexual de las crías (Bull y Vogt, 1979) debido a que presentan determinación sexual por temperatura (TSD, por sus siglas en inglés) mecanismo que se caracteriza porque se carece de cromosomas sexuales y el sexo del individuo depende únicamente de la temperatura de incubación, por lo que cada individuo puede desarrollarse como hembra o macho de acuerdo con las variaciones de temperatura (Bull, 1985; Torres-Maldonado y Merchant-Larios, 2006; Fig. 2).

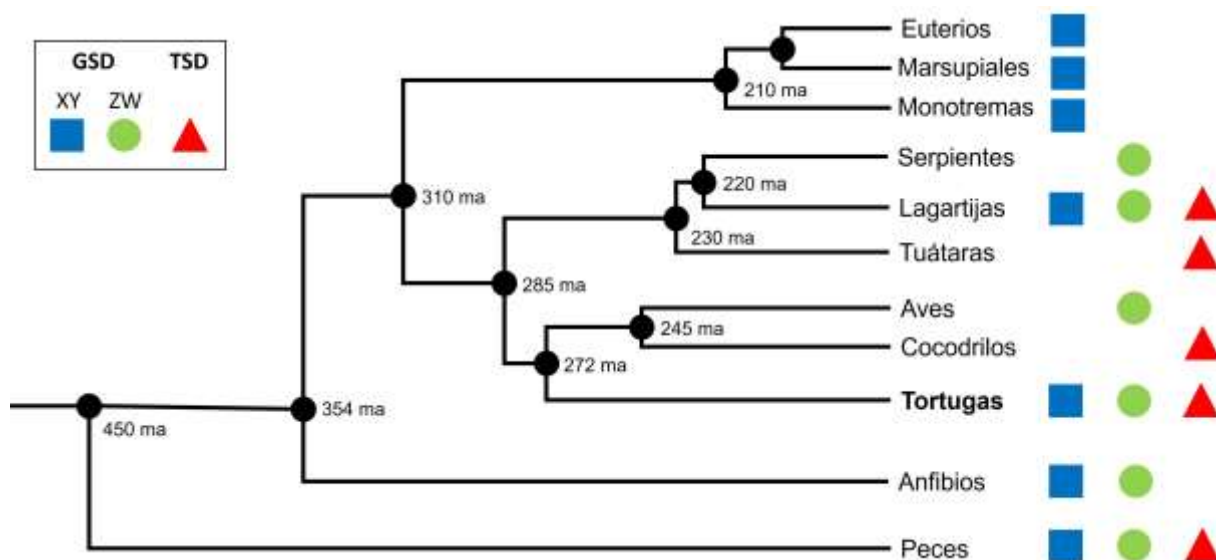


Figura 2. Mecanismos de determinación sexual en vertebrados. Tomada de Ezaz *et al.* (2006).

El primer registro sobre la determinación sexual por temperatura en reptiles fue realizado por Charnier (1966), quien incubó huevos en laboratorio de la lagartija *Agama agama* la mayoría de los huevos incubados en laboratorio a 26-27 °C resultaron hembras, mientras que los incubados a 29 °C resultaron machos, por lo que se consideró que probablemente en condiciones naturales la temperatura permitiría la diferenciación de sexos.

Se han identificado diferentes patrones de TSD en reptiles: (a) En cocodrilos y caimanes a temperaturas de incubación bajas y altas se generan, mientras que los machos se producen a temperaturas intermedias, por ejemplo, huevos de cocodrilos incubados a temperaturas constantes entre 28 y 31 °C generan 100 % de hembras, mientras que los huevos incubados a 32.5 °C producen 100 % de machos (Lang *et al.*, 1989).

Existe otro patrón en el que los huevos incubados a bajas temperaturas generan hembras y a temperaturas altas generan machos (b), como ocurre en lagartijas, por ejemplo, los huevos de Gecko leopardo incubados a 26 °C generan hembras, mientras que los incubados a temperaturas cercanas a los 32 °C producen una mayor proporción de machos (Bull, 1987), los tuátaras (18 °C generan hembras y 22 °C machos) (Cree *et al.*, 1995) y en algunas especies de cocodrilos (≤ 30 °C generan hembras y ≥ 34 °C machos) (Ferguson y Joanen, 1982). Un patrón distinto se ha observado en las tortugas (c) donde la producción de machos ocurre a bajas temperaturas y la producción de hembras se genera a temperaturas altas (Ciofi y Swingland, 1997; Fig. 3).

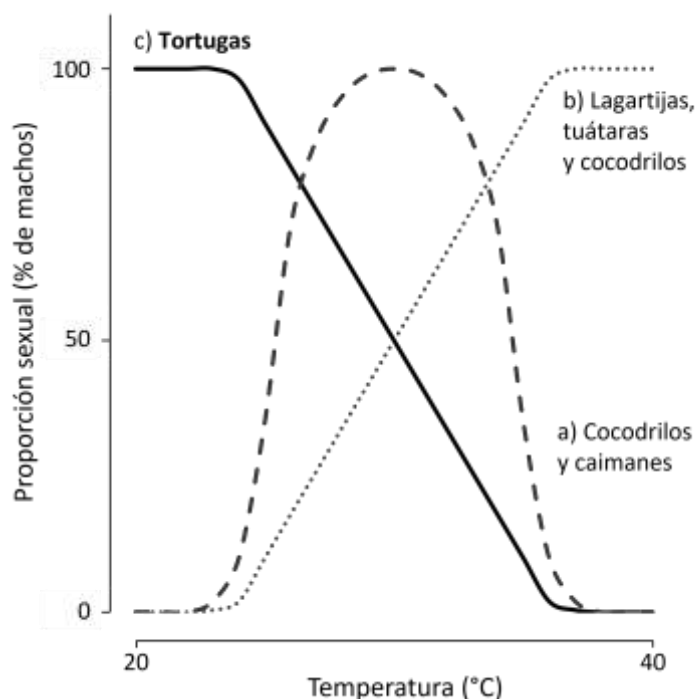


Figura 3. Proporción sexual de crías en reptiles en función de la temperatura de incubación. Tomada de Ciofi y Swingland (1997).

En las tortugas dulceacuícolas de los géneros *Chrysemys* (Bull y Vogt, 1979), *Emys* (Pieau, 1975), *Graptemys* (Bull y Vogt, 1979), *Pseudemys* (Bull et al., 1982), *Kinosternon*, *Sternotherus* (Vogt et al., 1982), *Chelydra* (Yntema, 1976), *Macroclermys* (Bull, 1980) y en tortugas terrestres de los géneros: *Terrapene* (Packard et al., 1985) y *Gopherus* (Spotila et al., 1994) se ha confirmado a través de estudios en laboratorio que la temperatura del nido es el principal agente que determina el sexo.

A través de diversos estudios se ha encontrado que todas las especies de tortugas marinas presentan TSD, por ejemplo: la tortuga boba (*Caretta caretta*) (Yntema y Mrosovsky, 1980), tortuga verde (*Chelonia mydas*) (Miller y Limpus, 1981), tortuga golfina (*Lepidochelys olivacea*) (Morreale et al., 1982), tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*) (Rimblot et al., 1985), tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*) (Dalrymple et al., 1985), tortuga lora (*Lepidochelys kempii*) (Shaver et al., 1988) y tortuga plana (*Natator depressus*) (Hewavisenthi y Parmenter, 2000), donde la incubación de los huevos a temperaturas por debajo de los 28 °C generan el 100 % de machos y huevos incubados a temperaturas por arriba de los 30 °C generan el 100 % de hembras, en la mayoría de las especies de tortugas marinas (Wibbels, 1998; Tabla 1).

Tabla 1. Temperatura de incubación en tortugas marinas. Tomada de Wibbels (2003).

Especie y Ubicación	Temperaturas de incubación (°C)		Referencia
	100 % machos	100 % hembras	
Tortuga caguama (<i>Caretta caretta</i>)			
U. S. A.	<27.5	30.4-30.5	Mrosofsky, 1988
Australia	<26	31	Georges <i>et al.</i> , 1994
Brasil	28	30.6	Marcovaldi <i>et al.</i> , 1997
Tortuga laúd (<i>Dermochelys coriacea</i>)			
Costa Rica	29	30	Binckley <i>et al.</i> , 1998
Tortuga carey (<i>Eretmochelys imbricata</i>)			
Antigua	28.5-29	30.3	Mrosofsky, 1992
Brasil	28.4	30.4	Godfrey <i>et al.</i> , 1999
Tortuga verde (<i>Chelonia mydas</i>)			
Suriname	<27.75	>29.2-30.7	Mrosofsky, 1984
Costa Rica	<28	>30.5	Spotila <i>et al.</i> , 1987
Tortuga golfina (<i>Lepidochelys olivacea</i>)			
Costa Rica	<28	32	McCoy <i>et al.</i> , 1983
Costa Rica	27	32	Wibbels <i>et al.</i> , 1998
Tortuga lora (<i>Lepidochelys kempii</i>)			
México	<29	31	Shaver <i>et al.</i> , 1988

2.2 Temperatura de la arena en playas de anidación de tortugas marinas

Debido al aumento de la temperatura global se ha registrado la temperatura en áreas de anidación de tortugas marinas. Entre los estudios en México se tiene a Garduño-Andrade y Cervantes (1996) ellos registraron la temperatura y humedad de diez nidos en corrales de incubación y cinco nidos naturales de tortuga carey (*E. imbricata*) usando termopares ubicados a 20 y 50 cm de profundidad, en Playa Las Coloradas, Yucatán, durante la temporada junio a agosto de 1993. En corrales de incubación la temperatura fluctuó entre los 26.5 y 35 °C, en el mes de junio se presentaron las mínimas temperaturas debido a la presencia de lluvias asociadas a una tormenta tropical, posteriormente, en julio la temperatura fluctuó entre los 29 y 33 °C, en agosto se registraron temperaturas entre los 32 y 35 °C. Mientras que, en nidos naturales la temperatura fluctuó entre los 26.8 y 33.5 °C en el mes de junio, en el mes de julio se observaron temperaturas entre los 28 y 32.5 °C, mientras que en agosto los registros rodaron entre los 29.5 y 33.9 °C. En este estudio se registró un mayor porcentaje de humedad en los nidos reubicados en corrales de incubación (0.2-18.3 %) que los nidos naturales (3-13.9 %). Por lo que se infirió que puede predominar la producción de hembras, además que se presentó mayor éxito de eclosión en los nidos ubicados en corrales protegidos.

Valadez-González *et al.* (2000) registraron la temperatura y la proporción sexual de 32 nidos de *L. olivacea* utilizando sensores digitales, en la playa de anidación La Gloria, Jalisco, durante los meses de agosto a diciembre de 1993. Los nidos sembrados entre el mes de agosto hasta principios de octubre desarrollaron 100 % hembras, cuando la temperatura fluctuó entre los 31.7 y 34 °C, en el mes de octubre se registró una proporción del 50 % en ambos sexos con temperaturas cercanas a los 30.5 °C y para los meses de noviembre y diciembre la proporción sexual fue 100 % machos cuando la temperatura fluctuó por debajo de los 30 °C.

Arzola-González (2007) analizó la temperatura, humedad y granulometría de la arena en nidos de tortuga golfina (*L. olivacea*) durante la temporada 1992-1993 en la playa El Verde, en Sinaloa. Registró la temperatura cada 24 horas utilizando un termosensor localizado al centro de la nidada en nidos naturales, nidos en corrales de incubación y nidos en cajas de poliestireno. En nidos naturales la temperatura fluctuó entre los 31.5 y 36.9 °C entre julio y principios de septiembre, en los nidos ubicados en corrales de incubación entre 31 y 34 °C entre septiembre y noviembre, mientras que en nidos colocados en cajas de poliestireno la temperatura fluctuó entre los 32 y 34.5 °C de mediados de septiembre hasta finales de octubre. Los nidos naturales presentaron mayor porcentaje de humedad (37.2-56.6 %) similar a los nidos en corrales de incubación (31.5-56.6 %), mientras que los nidos en cajas de poliestireno presentaron un porcentaje de humedad menor (23.4-44 %). En el análisis granulométrico de nidos naturales predominó arena de grano grueso (59 %) y la arena en nidos de corrales de incubación presentó una mayor proporción de arena de grano más fino (53 %).

Sandoval (2012) registró cada 30 minutos la temperatura *in situ* en 76 nidos utilizando sensores digitales programables, durante la temporada de anidación de *L. olivacea* de julio a diciembre de 2009 y 2010, en San José del Cabo (B. C. S.), Playa Ceuta (Sinaloa), Cuyutlán (Colima) y Tecpan de Galeana (Guerrero). En B. C. S. la temperatura en los nidos osciló entre los 25 y 35 °C, durante los meses de julio a octubre se presentaron temperaturas superiores a los 32 °C, a finales de octubre y noviembre las temperaturas oscilaron alrededor de 28 °C y posteriormente en diciembre se registraron valores por debajo de las temperaturas óptimas para el desarrollo de los embriones. En Playa Ceuta, Sinaloa la temperatura osciló entre los 22 a 37 °C, entre los meses de julio a octubre se registraron temperaturas superiores a los

32 °C y a finales de noviembre se presentaron temperaturas menores a los 28 °C. En el campamento de Colima las temperaturas variaron entre los 27 y 40 °C, para el mes de julio a septiembre las temperaturas fluctuaron entre los 32 y 38 °C, posteriormente en octubre la temperatura promedio estuvo en 38 °C y en los meses de noviembre y diciembre se observó una temperatura promedio de 29 °C. En Guerrero la temperatura osciló entre los 27 y 37 °C, durante los meses de julio a octubre la temperatura promedio estuvo alrededor de los 34 °C, mientras que entre noviembre y diciembre la temperatura promedio fue 30.5 °C. Se concluyó un sesgo hacia hembras en las cuatro áreas.

Posteriormente, De la Torre-Robles *et al.* (2017) registraron la temperatura utilizando sensores digitales en 13 nidos de las especies *D. coriacea*, *C. mydas* y *L. olivacea*, en la Playa San Juan Chacahua en Oaxaca, durante enero a mayo 2014. La temperatura de incubación en los nidos de *D. coriacea* se registró entre 29.1 y 34 °C con un periodo de incubación de 57 ± 2 días, para *C. mydas* entre los 28 y 32.8 °C con 51 días y para *L. olivacea* se registraron temperaturas entre 28.6 y 33.5 °C con periodos de 46 ± 4 días. Se encontró una tendencia feminizante.

Fuentes *et al.* (2009) registraron temperatura *in situ* de la arena en 5 playas de Australia donde anidan las especies *C. mydas*, *E. imbricata*, *L. olivacea* y *N. depressus* durante los años 2006 a 2008. A partir de temperatura del aire registrada *in situ* y de información proveniente del Conjunto internacional de datos globales sobre la atmósfera oceánica (ICOADS) así como la temperatura superficial del mar obtenida por satélites de la NASA (MODIS-aqua), pronosticaron temperatura de la arena a los años 2030 y 2070, utilizando análisis de regresión lineal. El modelo pronosticó un aumento de la temperatura de la arena entre los 0.5 y 5.6 °C para el año 2030, mientras que para 2070 se esperaba alcanzar un aumento entre los 1.6 y 6.6 °C, por lo que quizá se producirán principalmente hembras.

Laloë *et al.* (2016) trabajaron en la isla de San Eustaquio, en el Caribe nororiental, donde anidan las especies de tortugas marinas *C. mydas*, *E. imbricata* y *D. coriacea*, crearon una serie temporal de 200 años de temperatura en la arena a partir de un modelo de regresión lineal, utilizando mediciones de temperatura de la arena *in situ* con sensores digitales durante 2012, así como datos ambientales históricos y proyecciones climáticas. Las proyecciones mostraron que se registrarían temperaturas entre los 31 y 33.4 °C para el año

2030 con una proporción de machos de *C. mydas* del 2.4 %, propusieron temperaturas entre los 31.8 y 34.2 °C para el año 2060 donde la proporción sería del 1 % y para el año 2090 entre los 32.8 y 35.4 °C, pronosticando el 0.4 % de machos. Mientras que, se esperaría una proporción de hembras mayor al 95 % para *E. imbricata* en el año 2045 y para *D. coriacea* en 2028.

Binhammer *et al.* (2019) registraron temperatura en la arena y en los nidos de *L. olivacea* en playas de anidación de tortugas marinas en Guanacaste, Costa Rica con ayuda de sensores digitales *in situ* durante los años 2013 a 2017, la temperatura en los nidos fluctuó entre los 28.6 y 34.6 °C y en algunos nidos se registraron temperaturas por arriba de los 35 °C y presentaron un éxito de eclosión bajo.

Tanabe *et al.* (2020) registraron la temperatura de la arena utilizando sensores digitales *in situ* colocados a 30 y 50 cm de profundidad en los sitios de anidación de tortuga Carey (*E. imbricata*) y tortuga verde (*C. mydas*) en la región del Mar Rojo durante los meses de mayo a septiembre del año 2018. Encontraron temperaturas máximas de 36 °C a 30 cm y 35.3 °C a 50 cm de profundidad, lo que representa una amenaza considerable para la supervivencia de las crías de tortugas marinas en esos sitios.

Calderón-Peña *et al.* (2020) registraron la temperatura con sensores digitales en nidos de tortuga verde (*C. mydas*) en Playa La Barca y Playa Antonio ubicadas en la Península de Guanacahabibes, Cuba, durante seis años (2012-2018). Encontraron que en Playa La Barca la temperatura media del nido aumentó 1.5 °C de 2012 a 2018. Mientras que en Playa Antonio no se observó una tendencia al aumento de la temperatura. La temperatura media de los nidos superó los 30 °C en la mayoría de los años, se registraron tiempos de incubación menores a 55 días, por lo que se esperaría una producción de 90 % de crías hembras en ambas playas.

Natih *et al.* (2021) analizaron la idoneidad del hábitat de la tortuga golfina en la playa de Bali, Indonesia debido a la degradación de la zona causada por actividades humanas o factores naturales. Evaluaron el tamaño de grano, la humedad, el ancho de la playa, la pendiente y la temperatura de la arena utilizando mediciones *in situ*, así como el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica y percepción remota. Encontraron que

la playa está dominada por arena de color oscuro, donde más del 90 % es grava y una porción pequeña es de limo. La humedad osciló entre el 60 % y el 75 %. El ancho de playa se registró entre los 6.2 m hasta los 19 m. Mediante Modelos digitales de elevación se obtuvo una pendiente del 2 % hasta el 10 %. Mientras que la temperatura fue obtenida mediante imágenes Landsat 8 OLI, la cual osciló entre los 26.6 °C hasta los 27.9 °C.

Por lo que, estimar la temperatura de la arena es complicado mediante sensores digitales *in situ*, ya que no es posible obtener la temperatura del pasado ni durante largos periodos y los sensores pueden perderse en caso de desastres naturales como fuertes huracanes, además resulta costoso en el estudio de zonas extensas (Parra *et al.*, 2006; Laloë *et al.*, 2016).

2.3 Teledetección

El vocablo teledetección es una traducción al español del término en inglés *remote sensing*, atribuido a Evelyn Pruitt, geógrafa de la Oficina de Investigación Naval de EE. UU. Este término se propuso debido a que anteriormente se denominaba foteointerpretación al análisis de las imágenes aéreas, sin embargo, dicho término resultaba limitado, ya que no contemplaba los estudios más allá de la región del espectro visible, ni la información obtenida desde el espacio (Walker, 2006).

La teledetección es definida como la ciencia o técnica que permite la observación de la superficie terrestre mediante la adquisición de imágenes con sensores aéreos o espaciales, producto de la interacción energética entre el suelo y un sensor sin el contacto directo entre estos. Además, el término engloba las técnicas y los procesos involucrados en la obtención una imagen satelital, así como su posterior tratamiento, interpretación y análisis (Chuvieco, 2019).

2.3.1 Historia

Las primeras experiencias de la obtención de imágenes de la Tierra comenzaron en el año 1858, cuando Gaspar Félix de Tournachon obtuvo las primeras fotografías aéreas de la ciudad de Paris, Francia, a bordo de un globo cautivo. A partir de entonces, se utilizaron distintos dispositivos para la obtención de fotografías aéreas, por ejemplo, mediante el uso de palomas mensajeras, cometas, cohetes y globos no tripulados (Chuvieco, 2019).

En 1909, Wilbur Wright, ingeniero estadounidense, pionero en el desarrollo de aviones, adquirió la primera fotografía aérea desde su aeroplano en Francia, con lo que inició una larga historia en la observación desde aviones (Chuvienco, 2019). Durante la Primera Guerra mundial se desarrolló la primera cámara aérea, mientras que la Segunda Guerra Mundial implicó un notable desarrollo de las técnicas de teledetección aérea, gracias al desarrollo de las películas en infrarrojo y de nuevos sensores como el radar (Cohen, 2000; Fig. 4).

En 1947 se obtuvo la primera fotografía espacial que fue tomada a 200 km de altura en Nuevo México, California (EE. UU.), mediante un cohete V-2 requisado a los alemanes durante la Segunda Guerra Mundial. En 1957 se lanzó el Sputnik 1, que fue el primer satélite artificial enviado al espacio por la Unión Soviética, a partir de entonces se ha continuado con el lanzamiento de satélites artificiales con fines civiles y militares, lo que ha permitido exploraciones a la luna, planetas vecinos y el monitoreo de la Tierra (Chuvienco, 2019).

Posteriormente, por parte de los Estados Unidos se lanzó en 1960 el primer satélite meteorológico, denominado TIROS-I por sus siglas en inglés (Television Infra Red Observation Satellite), posteriormente el TIROS-II fue uno de los primeros satélites en enviar imágenes en vivo a la Tierra y permitió a los meteorólogos analizar la cobertura de nubes y producir mapas realizados a mano para el Servicio Meteorológico de los Estados Unidos (Laffly, 2020; Fig. 4).

Por su parte, la NASA creó el programa Landsat que actualmente proporciona el mayor registro de la cobertura terrestre realizado mediante satélites, el 23 de julio de 1971 fue lanzado el satélite Landsat 1, entonces llamado Earth Resources Technology Satellite (ERTS), que registra datos de cuatro bandas espectrales, correspondientes al verde, rojo y dos bandas del infrarrojo (IR) gracias a que estaba equipado con un sistema de cámara integrada llamado Return Beam Vidicon (RBV) y un sistema de escáner multiespectral (Multispectral Scanner System, MSS). Sin embargo, el satélite Landsat 1 sólo funcionó hasta el mes de enero de 1978 (Chuvienco, 2019).

En el mes de enero de 1975 fue lanzado el satélite ERTS-B, después nombrado Landsat 2, equipado con los mismos sensores que su predecesor. Transmitió información a estaciones terrestres internacionales hasta que terminó sus servicios siete años más tarde. Posteriormente, en el mes de marzo de 1978 se puso en órbita al satélite Landsat 3, con el

instrumento RBV y el MSS, que fue modificado para incluir una banda térmica infrarroja (Banda 8), aunque este falló poco después de su lanzamiento y fue dado de baja en 1983, mismo año en que las operaciones del programa Landsat se trasladaron a la NOAA, representando el primer paso hacia el proceso de comercialización de sus datos (Wulder *et al.*, 2019).

El satélite Landsat 4 fue lanzado en el mes de julio de 1982, este estaba equipado con el instrumento Thematic Mapper (TM) que permitía siete bandas espectrales: azul, verde, rojo, infrarrojo térmico e infrarrojo medio (SWIR) y dos bandas en el infrarrojo cercano (NIR). Un año después de su lanzamiento presentó fallas, por lo que perdió la capacidad de enviar información a la Tierra, y como consecuencia, se puso en línea un Sistema satelital de seguimiento y transmisión de datos (TDRS) que permitió reanudar las operaciones del satélite Landsat 4 hasta 1993 (USGS, 2022).

Por lo que en el mes de marzo de 1984 se puso en órbita al satélite Landsat 5 que tenía especificaciones idénticas al satélite Landsat 4. Landsat 5 transmitió más de 2.5 millones de imágenes de la superficie terrestre en todo el mundo, superando su vida útil original de tres años, hasta 2013 cuando dejó de operar (Fig. 4). En el mes de octubre de 1993, se lanzó el satélite Landsat 6, que incluyó el instrumento ETM (Enhanced Thematic Mapper), sensible a la luz desde el verde hasta las longitudes de onda del infrarrojo cercano, con un total de ocho bandas, sin embargo, la misión fracasó puesto que no logró alcanzar la velocidad necesaria en el lanzamiento para entrar en órbita (USGS, 2022).

Posteriormente, la NASA lanzó el satélite Landsat 7 en el mes de abril de 1999, permaneciendo vigente hasta la actualidad. Landsat 7 está equipado con el instrumento Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que permitió obtener una banda pancromática y un canal del infrarrojo térmico, teniendo en total ocho bandas: azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta, infrarrojo de onda media y pancromática. El programa Landsat continuó con el satélite Landsat 8 que fue lanzado en el mes de febrero de 2013, este satélite lleva a bordo dos instrumentos: Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS). El sensor OLI provee acceso a nueve bandas espectrales que cubren desde los 0.43 a 1.39 μm , mientras que el sensor TIRS registra de 10.3 a 12.5 μm , sumando un total de once bandas (USGS, 2019; Fig. 4).

A finales del mes de septiembre de 2021 se lanzó el satélite Landsat 9, que cuenta con los instrumentos OLI-2 y TIRS-2, también provee información a través de once bandas (Tabla 4), con mayor resolución espacial y temporal que Landsat 8, lo que permite complementar la información recabada por este, debido a una diferencia de ocho días en la adquisición de datos (USGS, 2022; Fig. 4).

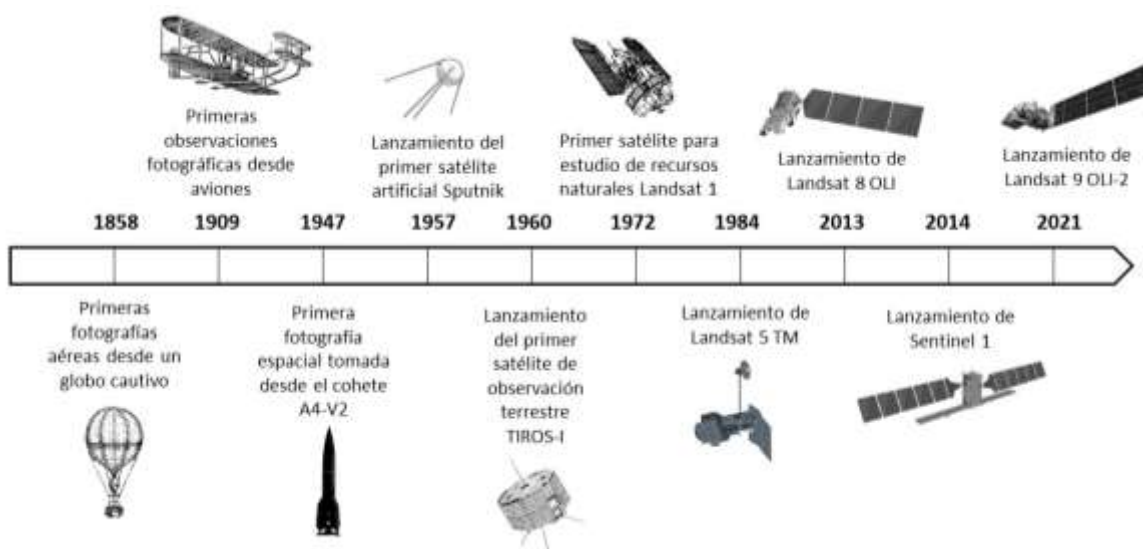


Figura 4. Evolución histórica de los sistemas de Teledetección. Modificada de Chuvieco (2019).

2.3.2 Principios físicos de la teledetección

La propagación de la radiación electromagnética se ha estudiado conforme se ha estudiado la naturaleza de la luz y sus propiedades, en el siglo XVII surgieron dos teorías para explicar esto: la teoría corpuscular, que propuso que la luz se compone de pequeñas partículas o corpúsculos que viajan en línea recta con gran rapidez, y la teoría ondulatoria postuló que la luz se compone por ondas mecánicas que se propagan en el vacío (Tippens, 2001; Chuvieco, 2019).

En 1865, James Clerk Maxwell, quien buscaba determinar las características idóneas de un medio para transmitir energía electromagnética, explicó que la luz se propaga como dos campos que oscilan perpendicularmente a la dirección en la que se propaga la onda y además son perpendiculares entre sí: el campo eléctrico y el campo magnético (Tippens, 2001; Fig. 5).

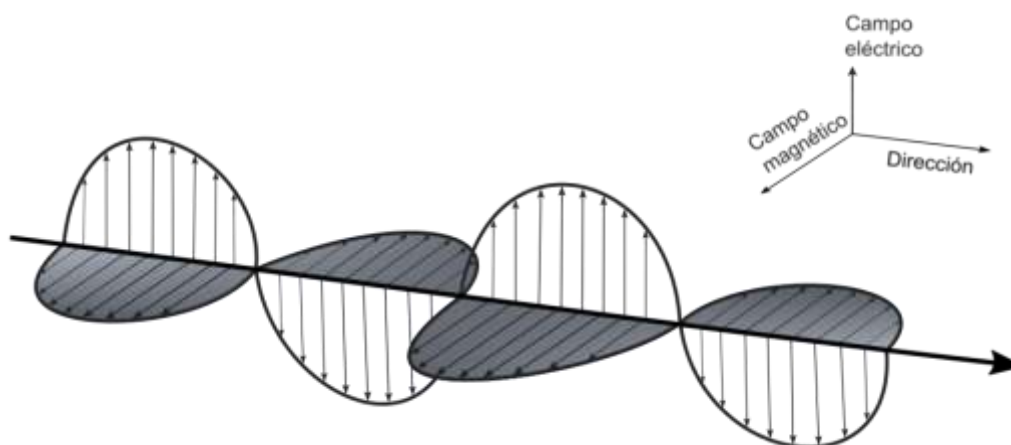


Figura 5. Campos eléctrico y magnético de la onda electromagnética. Tomada de Tippens (2001).

Actualmente, la teoría ondulatoria se emplea para estudiar la propagación de la luz, mientras que la teoría corpuscular da un enfoque sobre la interacción de la luz con la materia, partiendo de la concepción de la luz como energía radiante que se transmite por un campo ondulatorio y es transportada en forma de fotones.

En este sentido, las características del flujo energético pueden describirse por su frecuencia (f) y longitud de onda (λ). La frecuencia es el número de ciclos pasando por un punto fijo en cierta unidad de tiempo, mientras que longitud de onda se refiere a la distancia horizontal entre dos picos formados en una onda, en otras palabras, es la distancia entre dos crestas o dos valles consecutivos (Chuvieco, 2019; Fig. 6).

De acuerdo con la teoría cuántica, en la que Max Planck explicaba que la energía electromagnética no se absorbe o emite de manera continua sino en paquetes de energía que llamó cuantos, que posteriormente Albert Einstein denominaría fotones; la longitud de onda se relaciona con la frecuencia, siendo inversa y esto se resume en la ecuación de Planck, donde: E = energía del cuanto, h = constante de Planck (6.62×10^{-34} J-s) y f = frecuencia de la onda electromagnética (Tippens, 2001; Ec. 1).

$$E = hf \quad (1)$$

Por lo que, siguiendo este principio, una onda de baja frecuencia tiene una longitud de onda mayor, y viceversa, una onda de gran frecuencia tiene una longitud de onda menor (Chuvieco, 2019; Fig. 6).

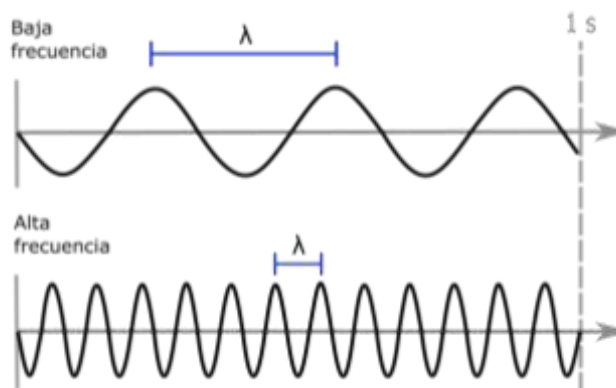


Figura 6. Relación entre frecuencia y longitud de onda.

2.3.3 Espectro electromagnético

Se denomina espectro electromagnético al conjunto de todas las ondas electromagnéticas, ordenadas de forma continua en regiones de acuerdo con su longitud de onda, o bien, con su frecuencia. De mayor a menor longitud de onda se tiene: las ondas de radio, las microondas, la región del infrarrojo, la luz visible (desde el violeta hacia la luz roja), los rayos ultravioleta (UV), los rayos X y los rayos gamma (Tippens, 2001; Fig. 7).

En teledetección, las regiones del espectro electromagnético comúnmente utilizadas son: la región de la luz visible (0.4 a 0.7 μm), donde se emplean tres bandas distintas, azul (0.4 a 0.5 μm), verde (0.5 a 0.6 μm) y rojo (0.6 a 0.7 μm). También se utilizan las distintas regiones del infrarrojo: el infrarrojo cercano (0.7 a 1.2 μm) con el que se pueden estudiar vegetación y concentración de humedad; el infrarrojo medio (1.2 a 8 μm), comúnmente empleado para detectar incendios o volcanes activos y para estimar gases atmosféricos; y el infrarrojo térmico (8 a 14 μm) que se utiliza para estimar la temperatura de la superficie terrestre. Además de las microondas (por encima de 1 mm) empleadas en los radares, de gran interés en el estudio de cobertura de nieve y capas de hielo (Chuvienco, 2019; Fig. 7).

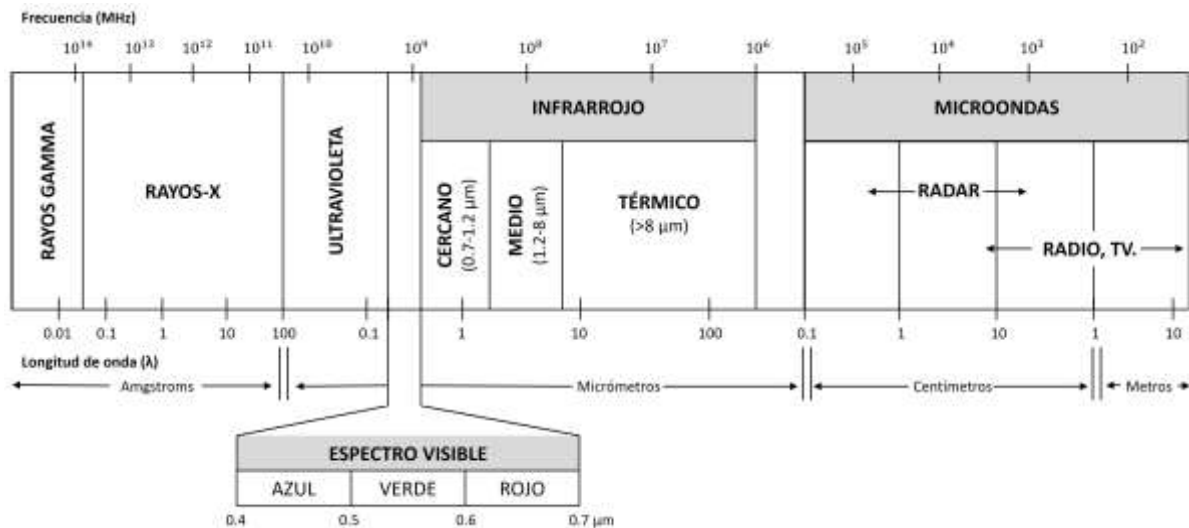


Figura 7. Regiones del espectro electromagnético. Tomada de Chuvieco (2019).

La energía electromagnética recibida por un sensor remoto representa la firma espectral del objeto, que se registra de acuerdo con las bandas espectrales del sensor, las cuales agrupan la señal de acuerdo con su representatividad en las regiones en el espectro electromagnético (Chuvieco, 2019).

2.3.4 Componentes de un sistema de teledetección

La obtención de una imagen de la superficie terrestre es el resultado de la interacción de los componentes de un sistema de teledetección, considerados como: una fuente de energía, la cubierta terrestre, un sistema sensor, un sistema receptor, así como la interpretación de la información que llegará a un usuario final. La fuente de energía se refiere al origen de la radiación electromagnética captada por el sistema sensor, si este es un satélite, la fuente naturalmente es el Sol, la radiación emitida por este astro se refleja en la cubierta terrestre para después viajar en sentido opuesto, a través de la atmósfera en dirección al sistema sensor, donde es captada (Chuvieco, 2019; Fig. 8).

El sistema sensor tiene como objetivo captar la energía electromagnética proveniente de la superficie terrestre, además la codifica y envía a un sitio de almacenamiento. Se compone de un dispositivo capaz de detectar la energía electromagnética (sensor) y una plataforma que lo alberga, es decir, el satélite respectivo.

Después de captar y codificar la radiación recibida por el sistema sensor, esta es enviada a un sistema de recepción, donde se almacena, es corregida y posteriormente, distribuida. Finalmente, la información se interpreta digital y visualmente para facilitar su llegada a un usuario final, quien analizará el documento final respondiendo a su problema de estudio (Chuvienco, 2019; Fig. 8).

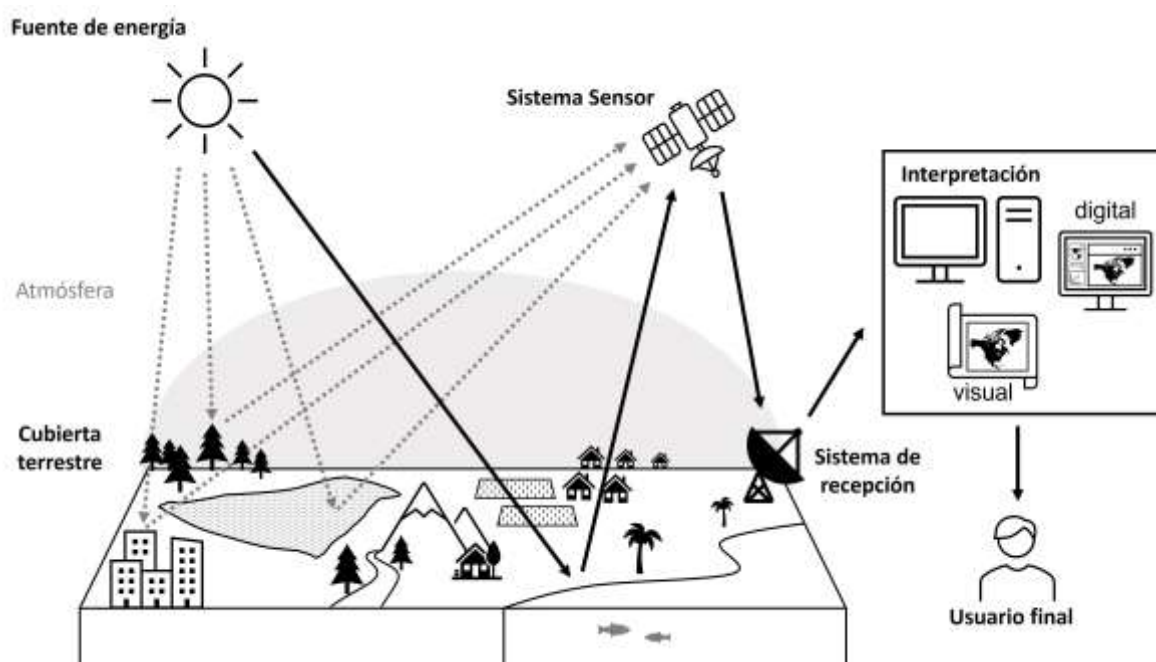


Figura 8. Elementos de un sistema de teledetección.

2.3.5 Obtención de una imagen de satélite

Una imagen de satélite es definida como la representación visual de la información de la superficie terrestre capturada por un satélite artificial, a través de su respectivo sensor o sensores a bordo. Cada imagen se compone por una serie de celdas llamadas píxeles, donde un píxel representa un valor discreto de la radiación total reflejada en un instante dado, al que se denomina nivel digital (ESRI, 2019). Esta información será tan detallada conforme el diseño de los sensores del satélite, así que tendrá cierta resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal (Chuvienco, 2019).

La resolución espacial es el tamaño del objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen, esta varía en función de factores como: la altura orbital y longitud focal, el número y tamaño de los detectores con que está diseñado el sensor, así como la velocidad

del satélite. La resolución espectral de una imagen corresponde a los intervalos de longitud de onda en el espectro electromagnético que puede distinguir el sensor, es decir, las bandas espectral con que está diseñado, donde un mayor número de bandas espectrales así como bandas más estrechas representa una mejor resolución espectral. La resolución radiométrica indica la intensidad de radiancia que el sensor puede discriminar o el rango máximo de niveles digitales (DN), es decir, el rango de valores de brillo que se pueden codificar en la imagen satelital, para ello se usa el formato binario, expresando la resolución espectral en número de bits.

Finalmente, la resolución temporal hace referencia a la frecuencia con la que el satélite pasa por un mismo sitio y capta una imagen, también se conoce como periodo de revisita. Esta es distinta para cada satélite debido su diseño (ángulo de observación y abertura) y a sus características orbitales (altura, velocidad e inclinación) (Chuvieco, 2019).

2.4 Temperatura superficial terrestre (LST)

Toda la materia está formada por moléculas que se mueven de forma desordenada de mayor o menor intensidad y tienen asociada determinada energía interna, conocida como energía cinética. La temperatura es la medida de la energía cinética media por molécula de un objeto, es decir, expresa el grado de agitación de sus moléculas. Cuanto mayor sea la energía interna del cuerpo, mayor es su temperatura (Tippens, 2001).

Un objeto puede experimentar transferencia de energía, lo que denominamos calor, que puede ocurrir por conducción (transferencia dentro del objeto sin movimiento), convección (implica el movimiento de masa de una región a otra) o radiación (energía electromagnética recibida). La transferencia de energía entre cuerpos tiene lugar mientras exista diferencia de temperatura entre los objetos, cuando las temperaturas se igualan, se dice que se mantiene el equilibrio térmico (Young y Freedman, 2013).

La temperatura superficial terrestre o LST por sus siglas en inglés (Land Surface Temperature), es la temperatura radiométrica del suelo o superficie de un terreno, es decir, la temperatura que se percibiría si se pusiera la mano sobre el suelo, siendo el producto de la transferencia de calor en la superficie de estudio (Hulley *et al.*, 2019).

2.4.1 Estimación de la LST

La atmósfera es un medio de transmisión de energía proveniente del Sol que actúa como un filtro para la Tierra, este permite que parte de la energía electromagnética sea absorbida o reflejada por los gases atmosféricos como el vapor de agua (H_2O), el ozono (O_3) y el dióxido de carbono (CO_2), mientras que otras regiones del espectro electromagnético penetran la capa atmosférica y pueden interactuar con los diversos materiales u objetos en la superficie terrestre, a estas regiones se les conoce como ventanas atmosféricas (Prata *et al.*, 1994; Aguirre, 2001).

Las ventanas en la región del infrarrojo térmico (TIR) en el espectro electromagnético, que va de los 8 y 14 μm , permiten que la energía térmica emitida por la superficie de la atmósfera llegue al espacio, donde los sensores satelitales pueden detectarla, de esta manera se puede estimar la temperatura superficial en diversos tipos de cobertura terrestre (Aguirre, 2001; Fig. 9).

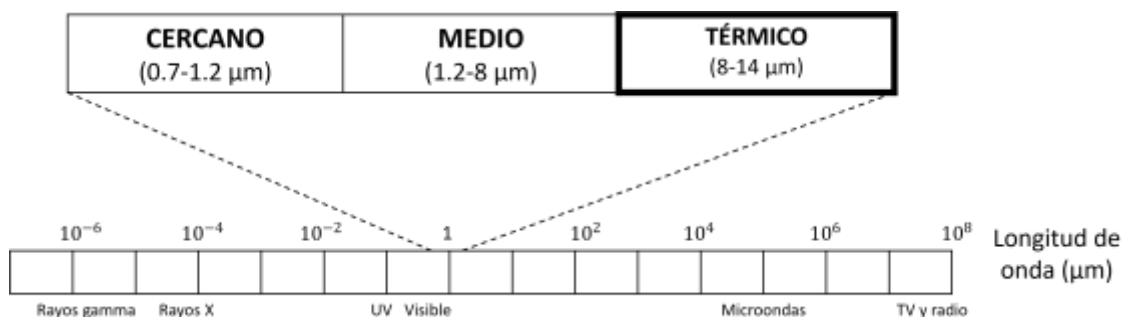


Figura 9. Región del infrarrojo en el espectro electromagnético.

En 1975, McMillin propuso el primer algoritmo, denominado de ventana dividida (SWA) utilizado para estimar temperatura de la superficie del mar (SST, Sea Surface Temperature), con el uso de la plataforma NOAA/AVHRR, desarrollado por la NASA y la NOAA, cuyo sensor ya era capaz de medir la radiación en cinco bandas del espectro electromagnético: rojo, infrarrojo medio y dos bandas en el infrarrojo térmico. Esta técnica se basó en que la radiancia emitida por la superficie experimenta una atenuación atmosférica que es proporcional a la diferencia entre la radiancia medida desde el satélite y la realizada simultáneamente en dos canales térmicos distintos.

Posteriormente, Price (1984) propuso utilizar el algoritmo propuesto por McMillin para obtener la LST, sin embargo, a diferencia de los cuerpos de agua casi homogéneos e isotérmicos, la LST se ve afectada por múltiples factores adicionales, por ejemplo, el tipo de cobertura terrestre, la emisividad dependiente del material, el terreno y la geometría de visualización.

Qin *et al.* (2001) desarrollaron un algoritmo monocanal en el que consideraron la emisividad y algunos parámetros atmosféricos, como la temperatura del aire y el vapor de agua, para estimar la LST con información de la banda 6 de imágenes del satélite Landsat 5 TM, estos parámetros no habían sido considerados en el proceso de estimación de la LST hasta entonces, por lo que fueron simulados con el programa LOWTRAN 7.0.

Posteriormente, Jiménez-Muñoz y Sobrino (2003) desarrollaron un algoritmo monocanal que no requiriera el procesamiento adicional de los parámetros atmosféricos que influyen en el cálculo de la LST, considerando que podrían contemplarse desde la radiancia. Con ayuda de notación matricial pudieron establecer los índices de vapor de agua y de esta forma reducir el proceso del cálculo de la LST.

Actualmente, para estimar la LST se utilizan métodos que se sirven de la emisividad de la superficie terrestre, es decir, la relación entre la energía radiada sobre la superficie y la que un cuerpo negro a la misma temperatura puede emitir (Chuvienco, 2019; Tabla 2).

Se define como un cuerpo negro a un objeto que teóricamente es capaz de absorber toda la radiación que incide sobre su superficie, lo que representa una emisividad igual a 1 (Tippens, 2001). El valor de emisividad de una superficie depende de su composición, por su contenido de humedad, su rugosidad y el tamaño de sus partículas. Por ejemplo, la vegetación tiene valores de emisividad bajos debido a que la energía incidente es absorbida, transmitida y reflejada en proporciones distintas según su longitud de onda (Barreto *et al.*, 2009).

Partiendo de este principio, recientemente se ha utilizado el método para estimar emisividad basado en el cálculo del Índice de vegetación de diferencia normalizada o NDVI, propuesto por Valor y Caselles (1996), este método es el más utilizado debido a que no

considera la influencia de rugosidad de la superficie y tiene mayor precisión, de 10-12 m (Wang *et al.*, 2019; Martínez-Barbáchano, 2020; Tabla 2).

Tabla 2. Técnicas para estimar la emisividad de la superficie terrestre. Tomada de Martínez-Barbáchano (2020).

Técnica para estimar emisividad	Autores
Método de emisividad normalizada (NEM)	Gillespie <i>et al.</i> (1985)
Índice Independiente de la Temperatura (TISI)	Becker y Li (1990)
Separación de emisividad (TES)	Gillespie <i>et al.</i> (1999)
Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	Valor y Caselles (1996)

2.4.2 LST en diversos materiales

Todos los objetos emiten radiación en rangos específicos de longitud de onda, la temperatura del objeto determina las características de su espectro de energía radiado, por lo que un objeto con alta temperatura superficial emitirá radiación de alta energía a longitudes de onda corta, por otra parte, uno más frío emitirá un espectro de energía más bajo a mayores longitudes de onda (Sobrinó *et al.*, 2000).

Este fenómeno se explica con la relación que expresa la Ley de Planck, debido a que la cantidad de energía que contiene un flujo radiante es inversamente proporcional a su longitud de onda, siguiendo la Ecuación 2, donde $M_{n\lambda}$ indica la emisividad de un cuerpo negro en determinada longitud de onda (λ), h es la constante de Planck ($6.62 \times 10^{-34} \text{ W s}^2$), c es la velocidad de la luz ($3.74 \times 10^8 \text{ W m}^{-2} \mu \text{ m}^4$), k es la constante de Boltzman ($1.38 \times 10^{-23} \text{ W s K}^{-1}$) y T corresponde a la temperatura absoluta de un cuerpo negro (Chuvienco, 2019).

$$M_{n\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left\{ \exp\left\{ \frac{hc}{\lambda kT} \right\} - 1 \right\}} \quad (2)$$

Se puede calcular el total de energía que un cuerpo negro radia por unidad de superficie al considerar su emisividad en todas las longitudes de onda, que se expresa a través de la Ley de Stefan-Boltzmann. Donde, σ representa la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) y T la temperatura (Chuvienco, 2019; Ec. 3).

$$M_n = \sigma T^4 \quad (3)$$

La emisividad de un objeto está directamente relacionada con su temperatura absoluta, así como con su capacidad para absorber la radiación solar que incide en él. Por lo que, si una superficie se encuentra en equilibrio térmico con su entorno, de acuerdo con la Ley de Kirchoff, la energía absorbida será igual a su emisividad (Ecuación 4), por lo que si la superficie absorbe más radiación, tendrá una mayor emisión.

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad (4)$$

Teniendo en cuenta la conservación de la energía, donde la suma de la energía absorbida ($\alpha_{\lambda(T)}$), reflejada ($\rho_{\lambda(T)}$) y transmitida ($\tau_{\lambda(T)}$) es igual a 1 (Ecuación 5) y suponiendo que la mayoría de los objetos tienen transmisión cero, podemos expresar convenientemente la emisividad como una función de la reflectancia (Hulley, 2019; Ec. 6).

$$\alpha_{\lambda(T)} + \rho_{\lambda(T)} + \tau_{\lambda(T)} = 1 \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\lambda(T)} = 1 - \rho_{\lambda(T)} \quad (6)$$

Por lo que una alta emisividad, con un valor cercano a 1, indica que un objeto absorbe y radia gran parte de la energía que incide en él, mientras que una baja emisividad ($\varepsilon < 1$), significa que el objeto absorbe y radia sólo una porción de la energía incidente. En cubiertas terrestres de interés ambiental, como en la vegetación densa se presenta un valor de emisividad de 0.98, en suelos arenosos de 0.9, en cubierta de nieve 0.8 y algunos metales presentan emisividad igual a 0.16, por mencionar algunos descritos (Chuvienco, 2019). Además, se conoce que el contenido de humedad afecta a los valores de emisividad de una superficie, se ha registrado que en suelos arenosos al aumentar el 8 % de la humedad se presenta una emisividad de 0.94 (Mulders, 1987).

Otro factor que influye en el comportamiento espectral del suelo es su composición química, que le otorga estructura y textura. La composición química causa el color que percibimos del

suelo, por ello los suelos de origen calcáreo son blanquecinos, ya que reflejan la radiación en todas las bandas del espectro visible, mientras que los suelos arcillosos presentan una alta reflectividad en el rojo por su contenido de óxidos de hierro. El contenido de humus refleja una baja reflectividad. Y generalmente, los suelos más finos y apelmazados representan una alta reflectividad.

Además, el comportamiento térmico de un objeto o superficie está relacionado con otros parámetros, como son: su capacidad, conductividad, difusividad e inercia térmicas, así como el índice de calentamiento. La capacidad térmica es la capacidad de un objeto de almacenar calor o energía interna, también se le conoce como calor específico si se estima por unidad de masa. Los cuerpos de agua pueden almacenar más calor que la vegetación o el suelo, debido a la existencia de los puentes de hidrógeno, que son interacciones moleculares muy fuertes, por lo que se requiere mayor cantidad de energía para elevar su temperatura, es decir, que poseen mayor capacidad térmica (Chuvieco, 2019).

La conductividad térmica es la capacidad que tiene un objeto para transferir calor. Por ejemplo, las áreas urbanas de composición compleja que incluyen materiales como el asfalto, el acero y cemento, son altamente conductoras en comparación con cubiertas de vegetación o suelos naturales, que resisten más la transferencia de calor.

La difusividad térmica es la velocidad en la que cambia la temperatura a través de la cubierta, es decir, la capacidad que tiene para transferir calor entre sus partículas, esta depende de su capacidad térmica, conductividad y densidad. Las cubiertas secas en comparación con las húmedas difunden a menor velocidad el cambio de temperatura hacia zonas profundas, es decir, tienen menor difusividad térmica (Chuvieco, 2019).

Mientras que la inercia térmica se refiere a la resistencia de un objeto a cambiar de temperatura, también es entendida como la capacidad de conservar el calor, la cual está dada por la masa del objeto y su calor específico, por lo que depende de su densidad. Los cuerpos de agua tienen alta inercia térmica debido a su alta conductividad, ya que la radiación incidente puede ser absorbida y transmitida en su superficie por convección, por lo que resulta difícil que cambie su temperatura. Los suelos arenosos y secos tienen baja inercia térmica, por ello presentan severos contrastes entre su temperatura durante el día y

la noche, mientras que los suelos más húmedos y arcillosos tienen alta inercia térmica, por ello son más resistentes al cambio y presentan temperaturas inferiores durante el día y superiores durante la noche en comparación con los suelos secos (Chuvienco, 2019; Fig. 10).

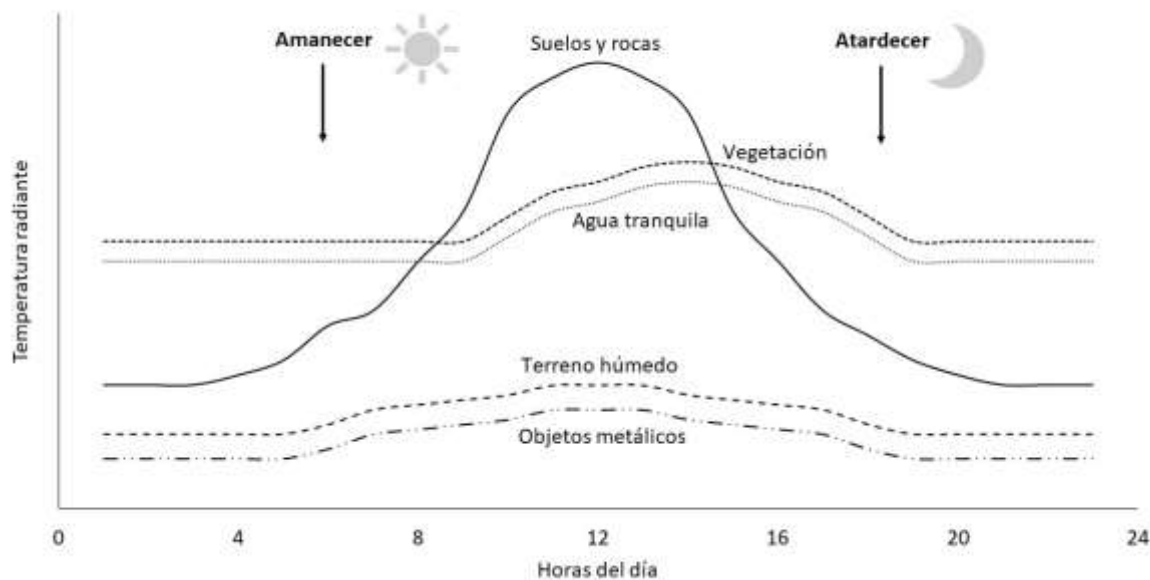


Figura 10. Cambios en la temperatura de diversas cubiertas durante un día. Tomada de Short (1982).

El índice de calentamiento es la relación de la intensidad de radiación solar recibida y la absorptividad de la superficie, las zonas en las que se impide la radiación solar directa tienen menor índice de calentamiento debido a que la radiación es atenuada, por ejemplo, en zonas con árboles, cubiertas con nubes o con edificios (Chuvienco, 2019).

2.4.3 Estimación de la temperatura superficial de la arena

Qin *et al.* (2002) estimaron la temperatura en la arena en la frontera de Egipto e Israel durante el periodo de 1995 a 1998 mediante imágenes de satélite Landsat 5 y su banda térmica, así como NOAA-AVHRR y un termómetro portátil infrarrojo para validar las estimaciones por teledetección, con el objetivo de analizar el cambio estacional y espacial de la temperatura de la superficie terrestre (LST) en la región fronteriza Israel-Egipto. Encontraron una diferencia de la LST entre ambos lados de la frontera, siendo el lado israelí donde predomina la superficie de arena desnuda y una capa biogénica, entre 2.5 y 3.5 °C más caliente que el lado egipcio.

Hereher (2016a) estimó la LST en Egipto a partir del NDVI, utilizando imágenes MODIS durante los años 2003 al 2014. Encontró que durante este periodo los valores de temperatura superficial fluctuaron entre los 31.7 y 48.3 °C, siendo la zona sur de Egipto la que presentó mayores temperaturas superficiales. Observó una tendencia al aumento de entre 0.3 a 1 °C por década en el desierto egipcio y propuso que las causas de la variación de la temperatura espacialmente son variables como la latitud, geología, topografía y al albedo de la superficie.

Con la misma metodología, Hereher (2016b) estimó la LST en 6 sitios de la región del Mar Rojo en Arabia Saudita para los años 2003 al 2014. Encontró que durante dicho periodo la temperatura superficial fluctuó entre los 25.7 y 57.9 °C, registrando un aumento de entre 0.4 a 1.2 °C por década, que se relacionó con la disminución de las precipitaciones en estas zonas áridas debido a que el análisis del NDVI mostró que existe una tendencia al decremento de la humedad.

Das y Das (2020) estimaron la LST en la región de Bengala occidental, India, durante los meses de enero, abril y octubre de los años 2000 y 2018 mediante el uso de imágenes Landsat 5 y 8. Encontraron que en el año 2000 las temperaturas en zonas con arena fluctuaron entre los 16.8 y 28.6 °C, mientras que en el año 2018 la temperatura de la arena fluctuó entre los 21 y 32.3 °C, siendo abril el mes más caliente en ambos años. Las medias de la temperatura de la arena en los 3 meses estudiados resultaron superiores en el año 2018.

3. JUSTIFICACIÓN

El aumento en la temperatura global representa una amenaza para las especies, principalmente para las dependientes de la temperatura en su desarrollo. Dado que la temperatura de la arena influye en el desarrollo embrionario, periodo de incubación y determina el sexo de las crías de tortugas marinas, además que todas las especies de tortugas marinas están en peligro de extinción, catalogadas en categoría de protección a nivel nacional y mundial (NOM-059 y IUCN), es necesario conocer las tendencias de la temperatura de la arena a lo largo de las playas de anidación durante las últimas décadas, y de esta manera para poder predecir hacia el futuro estas fluctuaciones y llevar a cabo propuestas de manejo para la conservación de las tortugas marinas.

Los métodos tradicionales para estimar la temperatura de la arena utilizan termómetros o sensores digitales *in situ*, sin embargo, no son útiles para estimar la temperatura del pasado ni durante largos periodos de tiempo, debido a que resulta costoso sobre todo en zonas extensas ya que es necesario colocar distintos sensores distribuidos a lo largo de la zona de estudio además, los sensores pueden perderse en caso de desastres naturales como fuertes huracanes (Parra *et al.*, 2006; Laloë *et al.*, 2016).

Por lo que, el uso de imágenes de satélite resulta una herramienta útil y de bajo costo para la obtención de la temperatura superficial de la arena a partir de los años 80's, gracias al acceso gratuito mediante el portal del Servicio Geológico de los Estados Unidos, así como la ventaja de ser procesadas a distancia.

El área de estudio se encuentra dentro de un Área Natural Protegida con categoría de Santuario y también es un Sitio RAMSAR, alberga 56 especies protegidas (CONANP, 2018a), por lo tanto, el presente estudio permitirá zonificar anualmente el área de acuerdo a su temperatura y resultará útil para poder proponer estrategias de manejo, ya que el área de estudio no cuenta con un Plan de Manejo que determine las estrategias de conservación, lo que beneficiaría a tortugas marinas y todas las especies de la zona.

4. HIPÓTESIS

Dado que se ha reportado un aumento de la temperatura global, podría identificarse un aumento de la temperatura de la arena en el área de estudio en las últimas décadas, a partir del análisis de la temperatura superficial de la arena mediante teledetección, el cual podría ser validado mediante registros de sensores *in situ*.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Determinar la tendencia de la temperatura de la arena en las últimas décadas, en el área de anidación de tortugas marinas del campamento tortuguero Playa Ceuta, Sinaloa, a través de teledetección, para contrastar y validar la técnica con registros de sensores *in situ*.

5.2 Objetivos particulares

1. Determinar y analizar la temperatura superficial de la arena derivada de imágenes de satélite durante los últimos 30 años.
2. Analizar la temperatura ambiental derivada de sensores digitales *in situ* durante los últimos 10 años.
3. Zonificar por año el área de anidación de acuerdo con su temperatura.

6. MATERIAL Y MÉTODOS

6.1 Área de estudio

El área de estudio corresponde a la zona de anidación que cubre el campamento Tortuguero Playa Ceuta, municipio de Elota, Sinaloa. El Campamento cubre 35 km de playa desde la Boca de Cospita en el norte, hasta la desembocadura del Río Elota al sur ($24^{\circ} 10' N$, $107^{\circ} 20' O$ y $23^{\circ} 54' N$, $106^{\circ} 57' O$) dentro de la península de Quevedo que encierra el sistema lagunar Ceuta-Tempehuaya (CONANP, 2018b; Fig. 11).

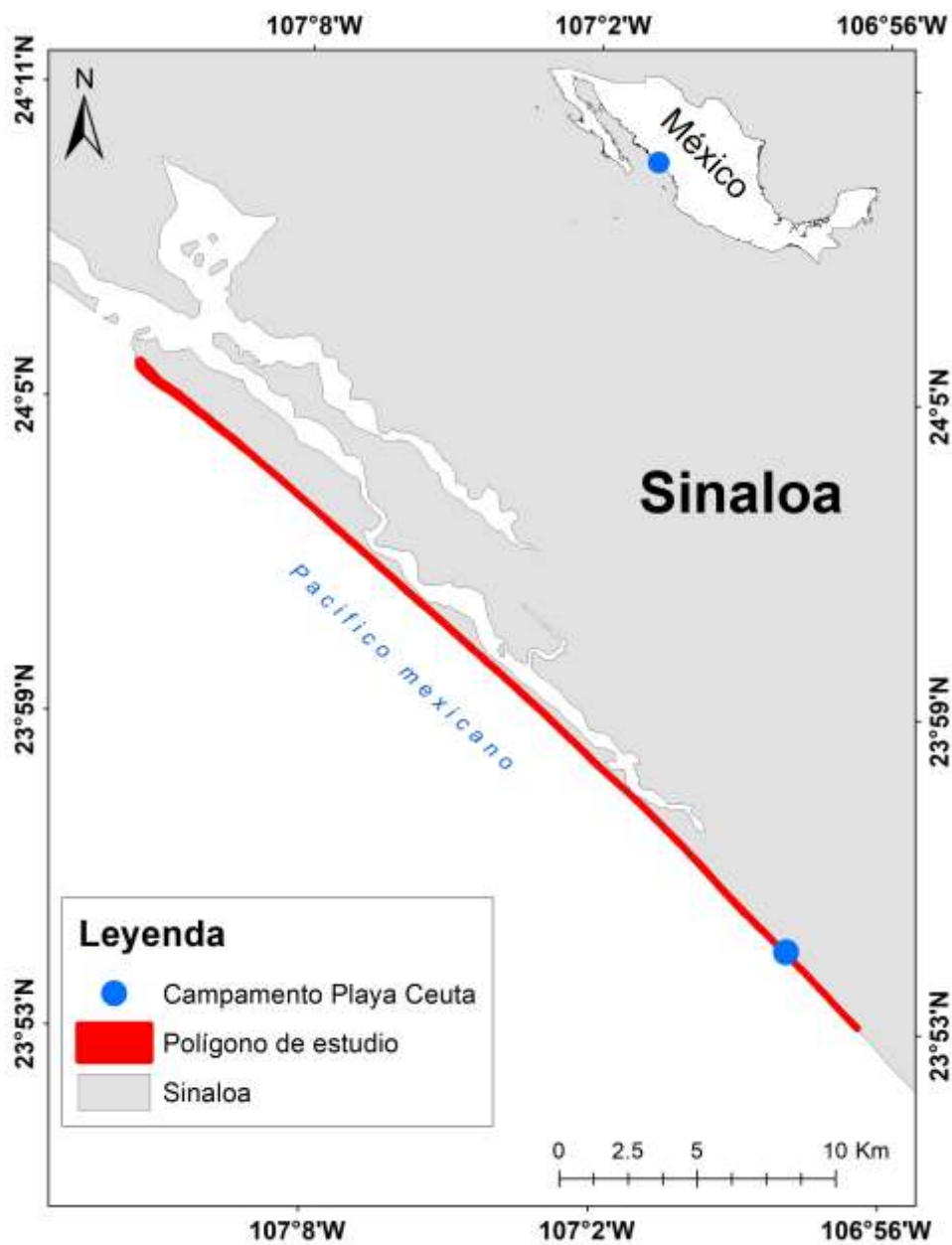


Figura 11. Polígono de estudio en la zona de anidación del Campamento Tortuguero Playa Ceuta, Sinaloa.

El área presenta un clima seco estepario, muy cálido, con lluvias durante el verano (precipitación media anual de 473 mm), propensa a tormentas tropicales y huracanes durante la temporada de lluvias, y que es afectada por el fenómeno de mar de fondo, donde se presentan mareas altas provocadas por fuertes vientos asociados a tormentas. La temperatura media anual es de 23.3 °C, con temperaturas máximas de hasta 41 °C y mínimas de hasta 3 °C (Rzedowski, 2006; CONANP, 2018a).

El Campamento de Playa Ceuta se fundó en 1976 por la Escuela de Ciencias del Mar de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) para desarrollar el Programa de Conservación y Protección de la Tortuga Marina. En octubre de 1986 se decretó como Área Natural Protegida por la CONANP con 144.1 ha de extensión, posteriormente se categorizó como Santuario según el acuerdo publicado el 16 de julio de 2002 en el Diario Oficial de la Federación (DOF, 1986, 2002).

La tortuga golfina (*L. olivacea*) es la especie de tortuga marina que constantemente arriba a esta playa, durante los meses de julio a diciembre, además ocasionalmente llegan a anidar la tortuga prieta (*C. mydas*) y la tortuga Laúd (*D. coriacea*), todas son consideradas especies en peligro de extinción por la IUCN y catalogadas dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010 para su protección (CONANP, 2018a; IUCN, 2021).

Dentro de las actividades del Campamento Tortuguero Playa Ceuta se encuentra la protección de huevos de tortugas marinas que se colectan a lo largo de la playa de anidación, para ello se cuenta con un corral de incubación (23° 54' 15.98" N, 106° 57' 30.58" O; 23° 54' 16.19" N, 106° 57' 30.39" O; 23° 54' 15.52" N, 106° 57' 30.18" O; 23° 54' 15.70" N, 106° 57' 29.98" O) que consta de una estructura temporal rectangular con postes de madera cercada con malla en los cuatro lados para proteger de la entrada de depredadores. El corral abarca cerca de 20 m de largo y 9 m de ancho, y se encuentra alejado de la orilla (aprox. 60 m) para evitar que este se inunde con las subidas de marea. Los huevos de cada nidada se siembran de forma ordenada dentro del corral de incubación, colocándolos a una profundidad de 40-50 cm. En el año 2009 se detectó una alta mortalidad de crías de tortuga marinas por lo que a partir de entonces se colocó malla sombra para cubrir la parte superior del corral y disminuir la temperatura de incubación (Sandoval, 2012).

El 02 de febrero de 2008 el área se incluyó en la declaración de Sitio RAMSAR dentro del Sistema Lagunar Ceuta que abarca 1,497 ha conformado por complejos lagunares y pantanos con una importante extensión de manglar. Además, es considerado un Sitio de importancia regional por la Red Hemisférica de Reservas para Aves playeras (Western Hemisphere Shorebird Reserve Network) debido a la presencia importante de aves. Se conoce que esta área alberga 56 especies de reptiles, aves, mamíferos, anfibios, insectos y plantas en alguna categoría de protección en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (CONANP, 2018a).

6.2 Temperatura superficial de la arena

6.2.1 Acervo de imágenes de satélite

Las imágenes de satélite se obtuvieron a través del portal del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) de la escena que cubre el área de estudio (Path:32; Row: 43), provenientes de los satélites Landsat 5 TM (1987-2012) y Landsat 8 OLI (2013-2021), durante los meses de julio-diciembre (Fig. 12; Tabla 3).

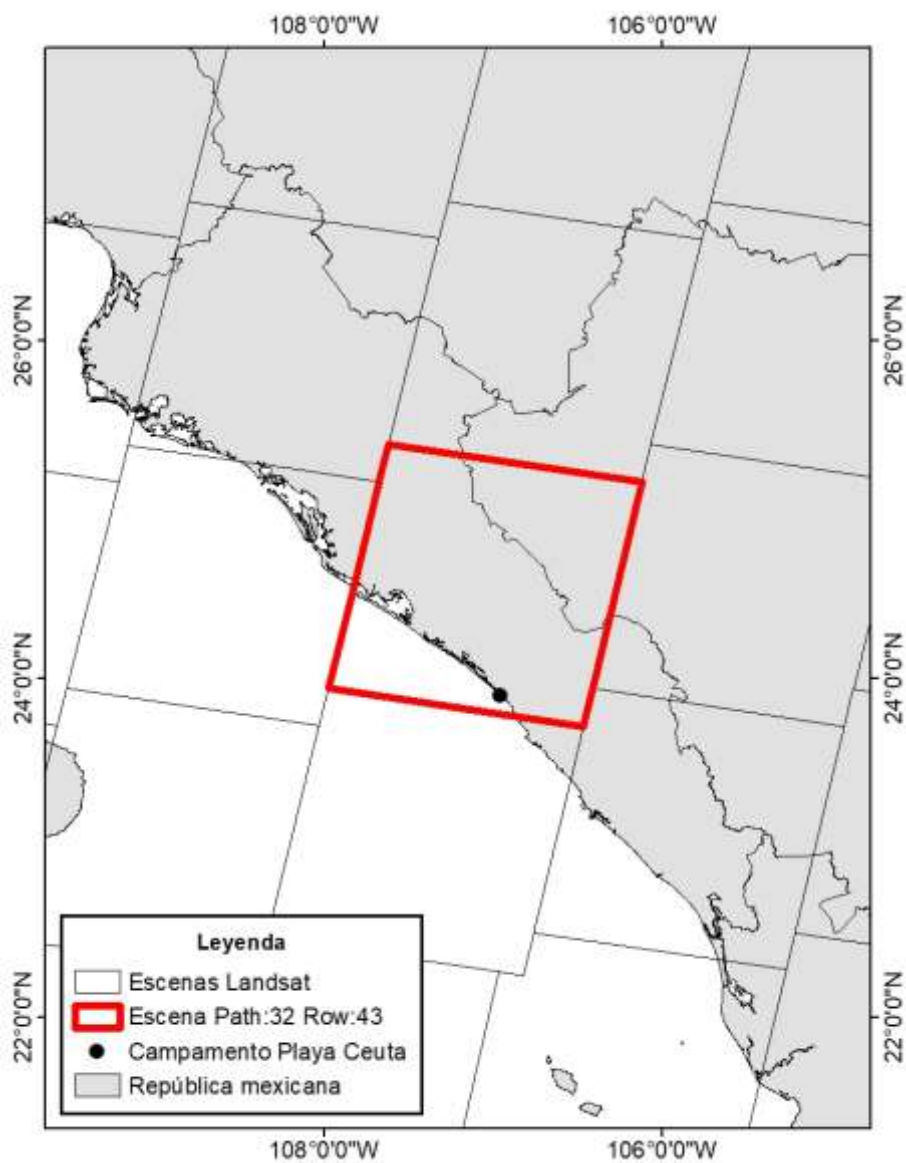


Figura 12. Escena Landsat que cubre el área de estudio (Path:32; Row: 43).

Tabla 3. Datos de adquisición de las imágenes de satélite utilizadas.

Satélite	Sensores	Ciclo de revisita	Hora promedio de registro	Operatividad	Años de imágenes utilizadas
Landsat 5	TM	16 días	17:25	1984-2013	1993-2011
Landsat 8	OLI, TIRS	16 días	17:35	2013-actualidad	2013-2021

6.2.2 Estimación de temperatura superficial de la arena

Para conocer la temperatura superficial de la arena se utilizaron las ecuaciones de Chander (2009) y la información de las bandas térmicas de las imágenes Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI (Tabla 4 y 5).

Tabla 4. Bandas espectrales de las imágenes Landsat utilizadas. Tomada de USGS (2022).

	Banda	Resolución espectral (μm)	Resolución espacial (m)
Landsat 5 TM			
1	Azul	0.45-0.52	30
2	Verde	0.52-0.60	30
3	Rojo	0.63-0.69	30
4	Infrarrojo cercano (NIR-1)	0.77-0.90	30
5	Infrarrojo cercano (NIR-2)	1.55-1.75	30
6	Infrarrojo térmico	10.4-12.5	120
7	Infrarrojo medio (SWIR)	2.09-2.35	30
Landsat 8 OLI			
1	Aerosol costero	0.43-0.45	30
2	Azul	0.45-0.51	30
3	Verde	0.53-0.59	30
4	Rojo	0.64-0.67	30
5	Infrarrojo cercano (NIR)	0.85-0.88	30
6	Infrarrojo (SWIR 1)	1.57-1.65	30
7	Infrarrojo (SWIR 2)	2.11-2.29	30
8	Pancromática	0.50-0.68	15
9	Cirrus	1.36-1.38	30
10	Infrarrojo térmico 1 (TIRS 1)	10.60-11.19	100
11	Infrarrojo térmico 2 (TIRS 2)	11.50-12.51	100

Para imágenes Landsat 5 TM primero se calibraron los niveles digitales (DN) a la radiancia espectral en el sensor según la Ecuación 5, donde L_λ es la radiancia espectral, con valores mínimos y máximos para la banda térmica expresados como $L_{\lambda max}$, $Qcal$ es el producto estándar cuantificado y calibrado por valores del píxel obtenido para cada banda, siendo $Qcal_{min}$ y $Qcal_{max}$ los valores mínimos y máximos obtenidos de los metadatos de cada imagen (Chander *et al.*, 2009).

$$L_\lambda = \left(\frac{L_{\lambda max} - L_{\lambda min}}{Qcal_{max} - Qcal_{min}} \right) (Qcal - Qcal_{min}) + L_{\lambda min} \quad (5)$$

Los datos de la banda térmica (Banda 6) se convirtieron a la temperatura de brillo (T_B) en el sensor, la cual supone que la emisividad en la superficie de la Tierra es uniforme, considerándola como un cuerpo negro (con valor de 1). Donde K_1 y K_2 son constantes de conversión específica de la banda térmica (Chander *et al.*, 2009; Ec. 6).

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1+1}{L_\lambda}\right)} \quad (6)$$

Para las imágenes Landsat 8 OLI los niveles digitales (DN) se convirtieron a la radiancia espectral estimada en la parte superior de la atmósfera (TOA), donde M_L es el factor multiplicativo y A_L es el factor aditivo de escalado específico para la banda correspondiente (Chander *et al.*, 2009; Ec. 7).

$$TOA = M_L * Q_{cal} + A_L \quad (7)$$

En seguida, la TOA se convirtió a la temperatura de brillo (T_B) en el sensor siguiendo la Ecuación 6. La temperatura de brillo se ajustó en función de la emisividad de la superficie estudiada, la cual se corrigió estimando el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) tomando los valores de reflectancia de las bandas NIR (Banda 5) y roja (Banda 4) (Tucker, 1979; Ec. 8).

$$NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo} \quad (8)$$

Posteriormente, se estimó la proporción de vegetación (Pv) de acuerdo con la Ecuación 9 para estimar la emisividad de la superficie (ε), donde $NDVI_{min}$ corresponde a píxeles de superficie desnuda y $NDVI_{max}$ corresponde a píxeles de superficie con vegetación (Carlson y Ripley, 1997; Sobrino *et al.*, 2004; Ec. 10).

$$Pv = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (9)$$

$$\varepsilon = 0.004 * Pv + 0.986 \quad (10)$$

Finalmente, para la estimación de la LST a partir de T_B y ε se utilizó la Ecuación 11, donde se considera que λ es la longitud de onda de la radiación emitida para la banda térmica utilizada, σ es la constante de Boltzmann, h es la constante de Planck y c corresponde a la velocidad de la luz. La unidad de los valores de la LST obtenidos es el Kelvin (K), por lo que se convirtieron a grados Celsius ($^{\circ}$ C) (Sobrino *et al.*, 2004). Los coeficientes radiométricos fueron obtenidos a través de los metadatos de cada una de las imágenes utilizadas (Tabla 5).

$$LST = \frac{T_B}{\left[1 + \left(\frac{\lambda \sigma T_B}{hc}\right) \ln(\varepsilon)\right]} - 273.15 \quad (11)$$

Tabla 5. Coeficientes radiométricos de las imágenes de satélite utilizados para estimar la LST.

Satélite	Banda	K_1	K_2	$L_{\lambda}max$	$L_{\lambda}min$	$Qcal_{max}$	$Qcal_{min}$	M_L	A_L
Landsat 5 TM	6	607.76	1260.56	15.30	1.23	255	1	-	-
Landsat 8 OLI	10	774.88	1321.07	-	-	-	-	$3.34e^{-4}$	0.1

Posteriormente, se utilizó el lenguaje de programación visual *Model builder* en el software ArcGIS 10.4.1 para crear el geoprocésamiento de las ecuaciones anteriormente descritas y de esta forma automatizar y optimizar la obtención de la temperatura superficial terrestre (Fig. 13 y 14).

En el flujo de trabajo los óvalos azules corresponden a las bandas térmicas utilizadas (.tiff) ó el polígono del área de estudio (.shp). Los rectángulos amarillos representan las herramientas utilizadas como *Raster Calculator (Spatial Analyst Tools/Map algebra/Raster Calculator)* para ejecutar cada una de las ecuaciones, además de la herramienta de geoprocésamiento *Extract by Mask (Spatial Analyst Tools/Extraction/ Extract by Mask)*, utilizada para extraer el polígono de estudio de la escena. Los elementos representados como óvalos verdes corresponden a variables de datos de salida, es decir, datos creados por una herramienta a partir de la ejecución del modelo (Fig. 13 y 14).

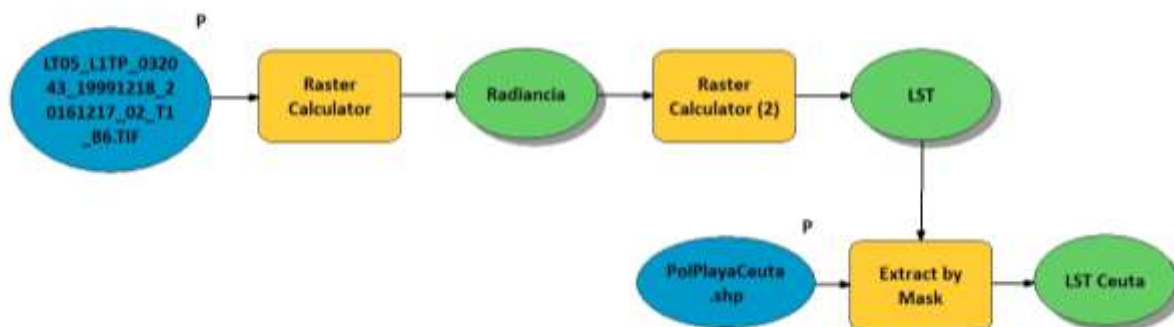


Figura 13. Diagrama de flujo para estimar la LST con imágenes Landsat 5 TM.

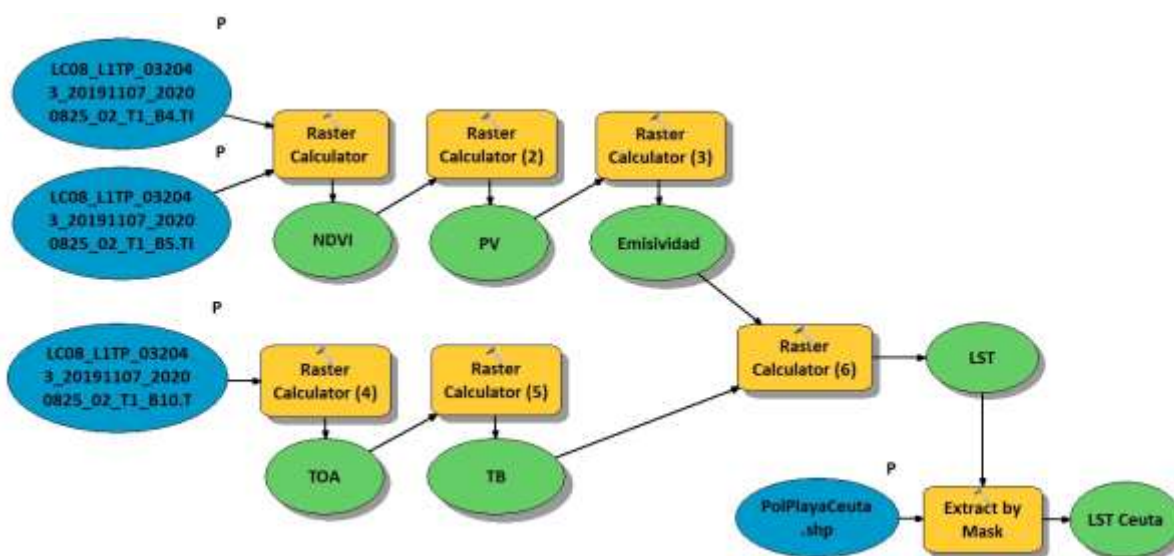


Figura 14. Diagrama de flujo para estimar la LST con imágenes Landsat 8 OLI.

6.3 Temperatura ambiental *in situ*

Los datos de la temperatura ambiental en el área de estudio fueron tomados por Sandoval (2012). Los registros se obtuvieron mediante un termómetro digital programable HOBO UA-001-08 con resolución de 0.1 °C, ubicado en una esquina del corral de incubación del Campamento tortuguero Playa Ceuta (Fig. 15). Los registros se obtuvieron cada 30 minutos durante la temporada de anidación julio-diciembre de los años 2009, 2010, 2019 y 2020.

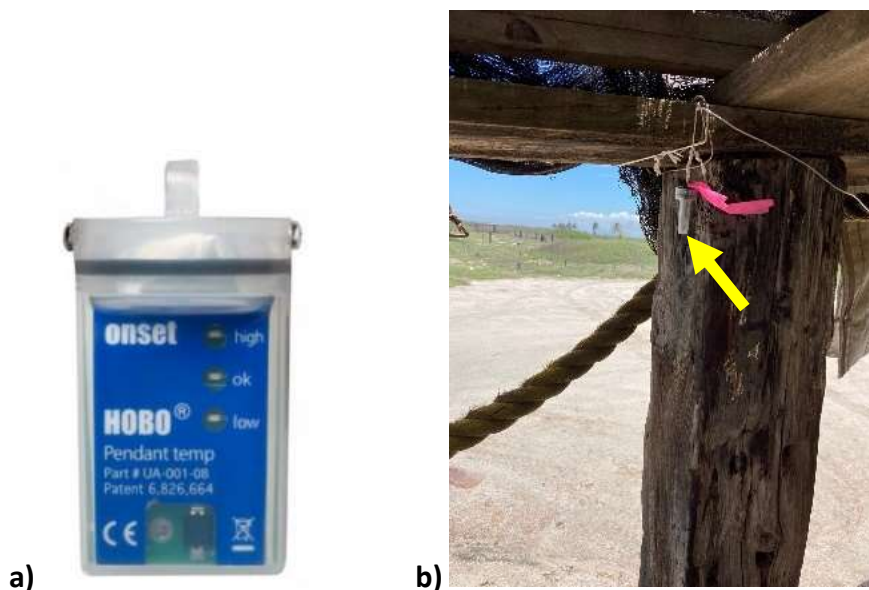


Figura 15. a) Sensor utilizado para medir la temperatura ambiental *in situ* (HOBO UA-001-08). b) Localización del sensor en el corral de incubación.

Para analizar los registros de temperatura ambiental se calcularon los promedios móviles para cada serie de datos, lo que permite observar la tendencia real a corto plazo de los datos. Se estimó el promedio móvil para un ciclo diario, por lo que se consideró un promedio móvil de orden 48 ($k = 48$), dado que se tomaron registros diarios cada 30 minutos, donde X_t representa a cualquiera de las series de la temperatura ambiental (Ec. 12; Sandoval, 2012).

$$pm(t) = \frac{X_{t-23} + X_{t-22} + \dots + X_t + X_{t+24}}{k} \quad (12)$$

6.4 Comparación de datos satelitales e *in situ*

Para identificar la precisión de los datos de temperatura superficial de la arena obtenidos mediante imágenes de satélite, éstos se compararon con los registros de temperatura ambiental registrados mediante sensores *in situ*. Se comparó el valor de temperatura entre ambos sensores con fecha y hora coincidente, por ejemplo, si una imagen de satélite se obtuvo el 08 de septiembre de 2009 a las 17:25 h, se buscó el valor de la temperatura obtenida con el sensor *in situ* del mismo día y hora más cercana, entonces se utilizó el valor de temperatura registrado el 08 de agosto de 2009 a las 17:30 h.

Dado que los registros de temperatura ambiental *in situ* se tomaron en el corral de incubación del Campamento Tortuguero Playa Ceuta, estos pixeles se consideraron para su comparación (Fig. 16).



Figura 16. Pixeles que cubren el corral de incubación.

6.5 Zonificación del área de estudio

El campamento Tortuguero Playa Ceuta, cubre un total de 35 km de playa, que inician al norte en la Boca de Cospita, hasta la desembocadura del Río Elota al sur. Dado que se ha reportado que el rango óptimo para el desarrollo de los embriones de tortugas marinas va de los 25 a 35 °C (Ackerman, 1997; Howard *et al.*, 2014), se realizó una propuesta de zonificación del área de estudio de acuerdo con los valores de temperatura superficial de la arena en el polígono que permitió conocer la zonas no viables para el desarrollo de las crías de tortugas marinas.

Se realizaron mapas donde se identificaron zonas no viables, es decir, los pixeles con temperaturas no viables, durante los meses de la temporada de anidación de las tortugas marinas en los últimos tres años del periodo de estudio (2019-2021). Para extraer los pixeles

no viables en cada caso, se utilizó la herramienta *Raster Calculator*, mediante el software ArcGIS 10.4.1, para seleccionar los píxeles con temperaturas menores a los 25 °C y píxeles con temperaturas superiores a los 35 °C.

6.6 Análisis estadísticos

A los registros de la temperatura superficial de la arena se les aplicó la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov previamente ($p < 0.05$). Posteriormente, se analizaron mediante una prueba de análisis de varianza (ANOVA) de una vía, basada en una prueba de hipótesis sobre las medias de dos o más poblaciones para saber si estas son iguales (Zar, 1999).

El resultado del ANOVA indicaría que, si existe diferencia entre las medias de los años estudiados para un mes en específico, esto significa que existe un cambio en la temperatura superficial de la arena. Para la prueba de hipótesis se consideró:

H_0 = las medias de las temperaturas superficiales de la arena de todos los años son iguales.

H_A = al menos una de las medias es distinta.

Posteriormente, si al menos una de las medias resultaba distinta, se utilizó una prueba de Tukey para realizar comparaciones múltiples entre las medias de cada mes y años correspondientes, considerando que el grupo de datos de un año en un mes específico representa un tratamiento de acuerdo con la naturaleza de esta prueba. Se consideró un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

Para analizar la temperatura ambiental obtenida mediante sensores digitales *in situ* también se utilizó una prueba ANOVA de una vía, considerando en este caso la comparación de medias por mes entre los años 2009, 2010, 2019 y 2020. De ser necesario, posteriormente se realizó una prueba de Tukey para encontrar diferencias significativas.

Los estadísticos utilizados para verificar las diferencias entre los datos obtenidos mediante ambas técnicas fueron el porcentaje de error relativo (% ER) y el error cuadrático medio (RMS) (Williams, 2011).

El porcentaje de error relativo (% ER) se calculó de acuerdo con la Ecuación 13, donde $T_{in\ situ}$ corresponde al registro de temperatura ambiental mediante el uso de sensores digitales *in situ*, considerado como el valor real de temperatura, mientras que, T_{sat} corresponde al valor obtenido mediante una imagen de satélite, es decir, el valor estimado.

$$\% RE = \left| \frac{T_{sat} - T_{insitu}}{T_{insitu}} \right| \times 100 \quad (13)$$

Porcentajes de error relativo menores representan que los valores de temperatura superficial de la arena son más cercanos a los valores de la temperatura ambiental (Kat y Schalk, 2012).

El error cuadrático medio (RMS) se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{sat} - T_{insitu})^2}{n}} \quad (14)$$

Las pruebas anteriormente descritas se realizaron en el software Matlab 2016a.

7. RESULTADOS

7.1 Temperatura superficial de la arena

Se descargaron un total de 292 imágenes de los satélites Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI, durante los meses de julio-diciembre de los años 1987 al 2021. Se realizó una primera depuración de imágenes de satélite excluyendo las que contenían más del 10 % de nubes por escena como se sugiere en la literatura (Matiz-León *et al.*, 2019; Du *et al.*, 2020), por lo que se obtuvieron un total de 208 imágenes.

Posteriormente, se estimó la temperatura superficial de la arena de cada una de las 208 imágenes de satélite y se encontró que a pesar de que todas las imágenes contenían un porcentaje menor al 10 % nubes, se obtenían temperaturas menores a 0 °C aún en los meses de verano, por lo que se analizaron los valores de temperatura de los píxeles del polígono del área de estudio y se detectó que incluso píxeles cercanos presentaban diferencias de hasta 20 °C, debido a que éstos se cubrían por el mínimo porcentaje de nubes de la escena. Por tal motivo, se dejó fuera del análisis a las imágenes con cobertura de nubes en la zona de estudio y se obtuvo un total de 101 imágenes (Tabla 6, Anexo A).

Tabla 6. Número de imágenes de satélite utilizadas.

Satélite	Número de imágenes utilizadas
Landsat 5	64
Landsat 8	37

En la Figura 17, se presentan las temperaturas obtenidas en el polígono de estudio del mes de julio para todos los años analizados, utilizando las imágenes de satélite libres de nubes. En el mes de julio la temperatura superficial de la arena registrada osciló entre los 21 °C y 35.7 °C. En la década de los 90's predominaron temperaturas entre los 20 y 30 °C. En la década de los 2000's se tuvieron temperaturas entre los 20 y 36 °C y en la década de los 2010's entre los 22 y 36 °C, finalmente, en la década de los 2020's se observaron temperaturas entre los 24 y 36 °C.

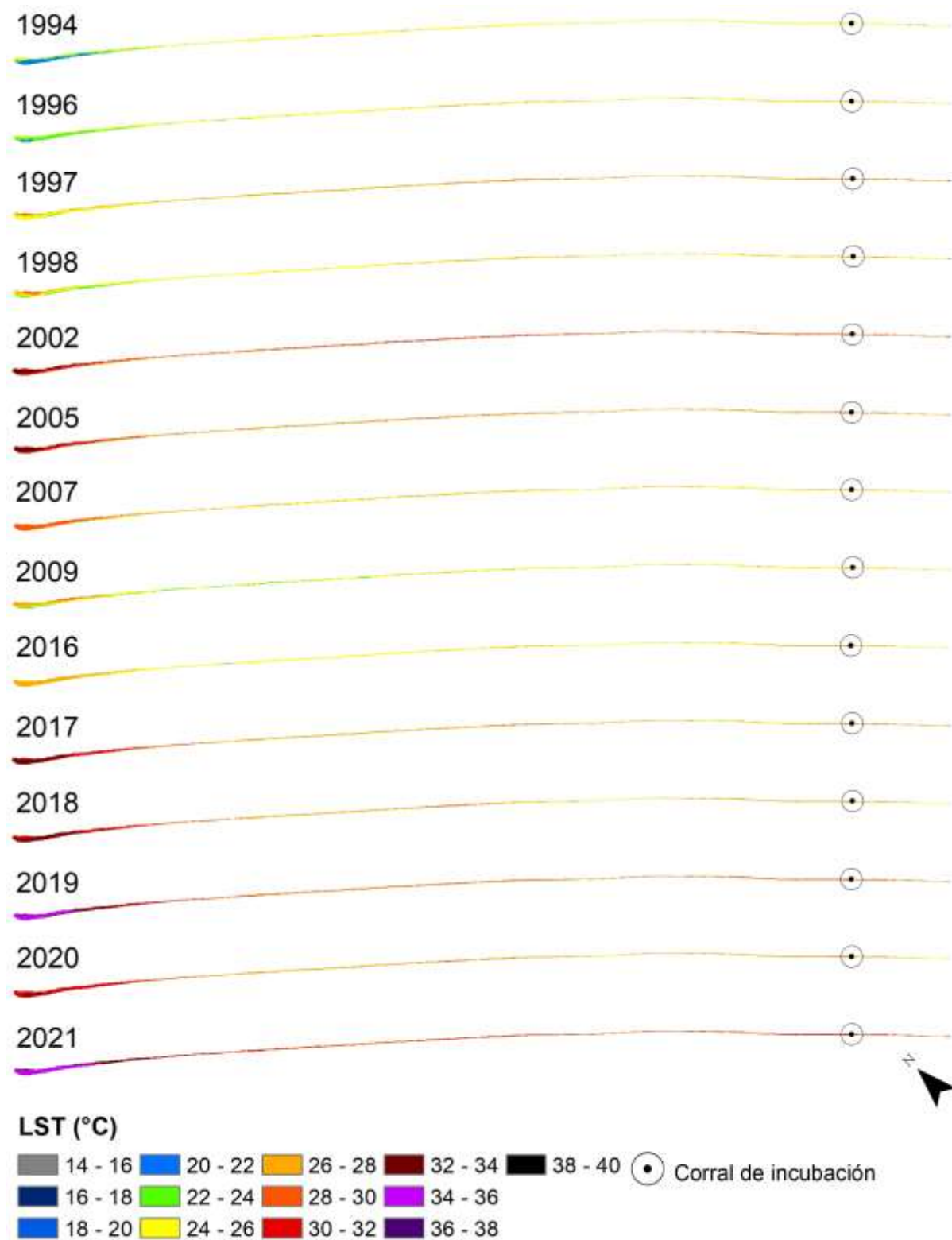


Figura 17. Distribución de la temperatura superficial de la arena (LST) del mes de julio del polígono de estudio, el círculo negro representa la ubicación del corral de incubación.

En los Anexo B se muestra la distribución de las temperaturas de los meses y años faltantes. Para el mes de agosto la temperatura superficial de la arena fluctuó entre los 20.1 °C y 39.1 °C. Durante la década de los 90's predominaron temperaturas entre los 20 y 32 °C

principalmente, durante la década de los 2000's la temperatura osciló entre los 20 y 40 °C, mostrando un máximo de cerca de 40 °C en el año 2000. En la década de 2010's se observaron temperaturas entre los 22 y 32 °C, con excepción del año 2013 con temperaturas de hasta 36 °C. Para el año 2020 predominaron temperaturas entre los 24 y 32 °C.

En el mes de septiembre se registraron temperaturas entre los 19.2 °C y 35.2 °C, durante este mes se presentaron lluvias por lo que las imágenes contenían altos porcentajes de cobertura de nubes, durante la década de los 90's se observaron temperaturas entre los 20 y 36 °C, en la década de los 2000's la temperatura fluctuó entre los 18 y 32 °C, en la década de los 2010's y 2020's fluctuó entre los 24 y 34 °C (Anexo B).

Durante el mes de octubre la temperatura superficial de la arena osciló entre los 22.3 °C y 40.3 °C. En los 90's se detectaron temperaturas entre los 14 y 36 °C y posteriormente, pero en la década de los 2000's aumentaron entre los 22 y 40 °C. En la década de los 2010's se observaron temperaturas entre los 24 y 38 °C, mientras que, en la década de los 2020's fueron superiores, con valores de entre los 26 y 40 °C (Anexo B).

En el mes de noviembre la temperatura superficial de la arena fluctuó entre los 20.1 °C y 37.3 °C. En la década de los 90's la temperatura osciló entre los 20 y 30 °C, pero a partir de la década de los 2000's aumentó a un promedio de 22 a 36 °C. Posteriormente, hubo un aumento en la década de los 2010's, donde la temperatura registrada fue de entre 22 y 38 °C. Finalmente, en la década de 2020's la temperatura fue de entre 24 y 34 °C (Anexo B).

Durante el mes de diciembre la temperatura osciló entre los 14.7 y 32.4 °C. En la década de los 90's se registraron temperaturas entre los 14 y 28 °C, para la década de los 2000's aumentaron entre los 18 y 32 °C, y posteriormente, en la década de los 2010's aumentaron entre los 22 y 28 °C. En el año 2020 se registró la temperatura entre los 20 y 26 °C (Anexo B).

En la Figura 18 se muestran los diagramas de cajas y bigotes donde se observa la distribución de los valores de temperatura superficial de la arena de los 2,073 píxeles que cubren el polígono de estudio. Se muestra el comportamiento de la mediana (M_e , línea roja), primer cuartil y tercer cuartil (límites de las cajas) a lo largo de los 28 años de estudio durante los meses de la temporada de anidación. Se encontró que para los diferentes años el mes de

octubre fue el mes más cálido y el mes de diciembre el más frío. Los valores de temperatura mínima, máxima y media para cada año de todos los meses se muestran en el Anexo C.

En el mes de julio las medianas aumentaron a partir de la década de los 2010's y para el año 2021 la mediana superó los 30 °C. En el mes de agosto no se observó una tendencia, pero se detectó que los años 2000 ($M_e=31.2$ °C) y 2013 ($M_e=30.7$ °C) fueron muy cálidos. En el mes de septiembre las medianas aumentaron a partir de la década de los 2000's, superando los 25 °C, además, el año 1999 resultó ser el más cálido ($M_e=30.4$ °C). En el mes de octubre se registraron medianas entre los 25 y 30 °C, y a partir de la década de los 2010's fueron mayores a 30 °C, así como en el año 2004 ($M_e=30.8$ °C). Durante el mes de noviembre se percibió que las medianas aumentaron a finales de la década de los 2010's, superando los 30 °C, sin embargo, en el año 2019 y los años 2020's fueron inferiores a 30 °C. Finalmente, en el mes de diciembre las medianas aumentaron a partir de mediados de la década de los 2000's, por arriba de los 25 °C, posteriormente, se detectaron medianas inferiores a 25 °C en los años 2019 y 2020 (Fig. 18).

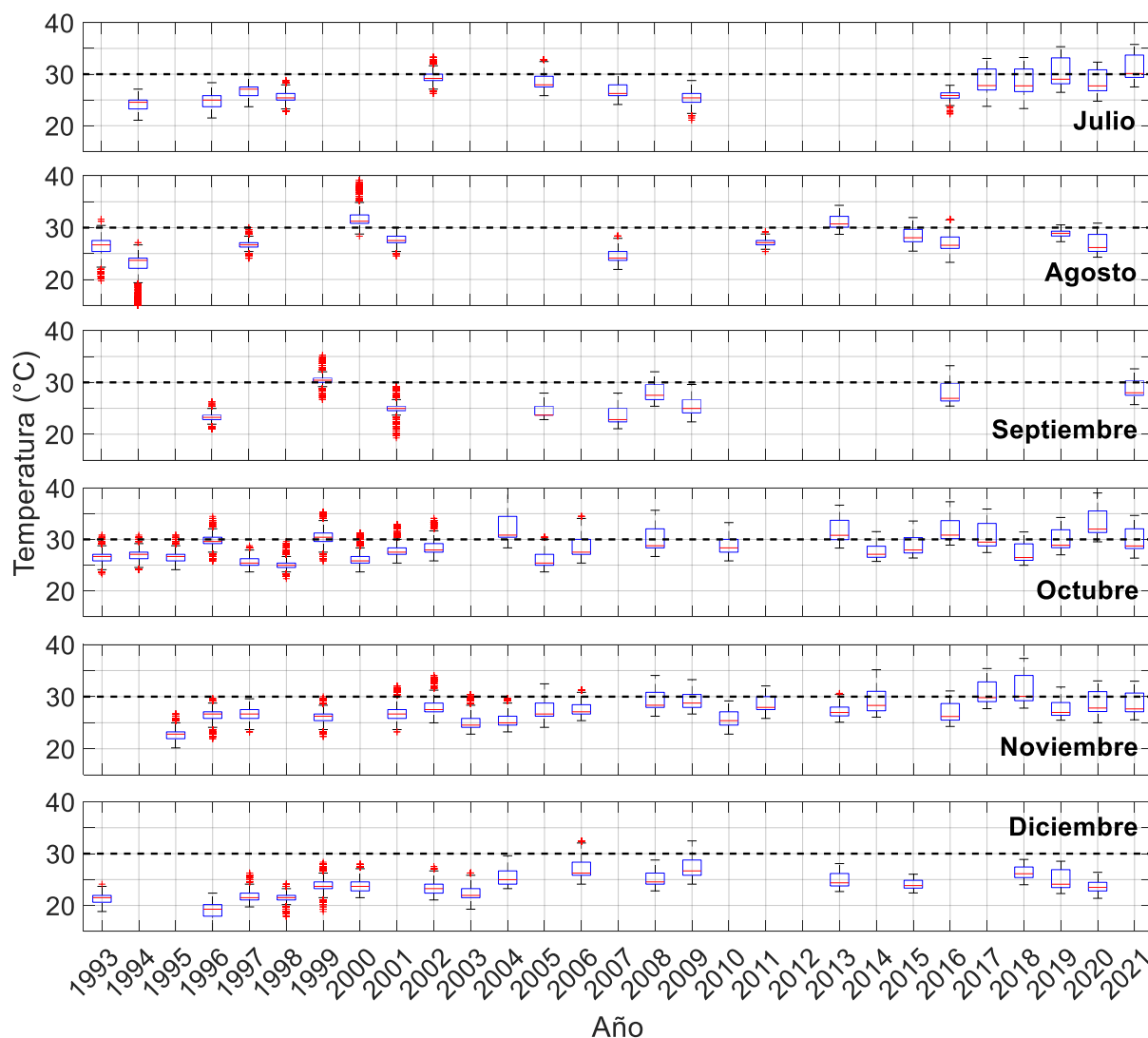


Figura 18. Diagramas de cajas y bigotes de la temperatura superficial de la arena del polígono de estudio. En cada caja los bordes inferior y superior representan los percentiles 25 y 75 respectivamente, la línea roja en el centro es la mediana. Los bigotes representan el valor mínimo y máximo de la serie de datos. Los valores atípicos se representan con el signo + en rojo. La línea negra punteada indica 30 °C.

Posteriormente, se realizaron histogramas de frecuencias de la temperatura superficial de la arena de los píxeles del polígono por año, como se muestra en la Figura 19. Se encontraron frecuencias desde los 14-18 °C hasta los 38-42 °C. En los meses de julio a noviembre predominaron frecuencias de temperatura de 22-26 °C y 26-30 °C a lo largo de todas las décadas, sin embargo, en la década de los 90's durante los meses de julio a septiembre también se registraron frecuencias de 18-22 °C, lo que no se observó en años posteriores. En el mes de julio aumentaron las frecuencias de 30-34 °C a partir de la década de los 2000's y frecuencias de 34-38 °C a partir de finales de la década de los 2010's.

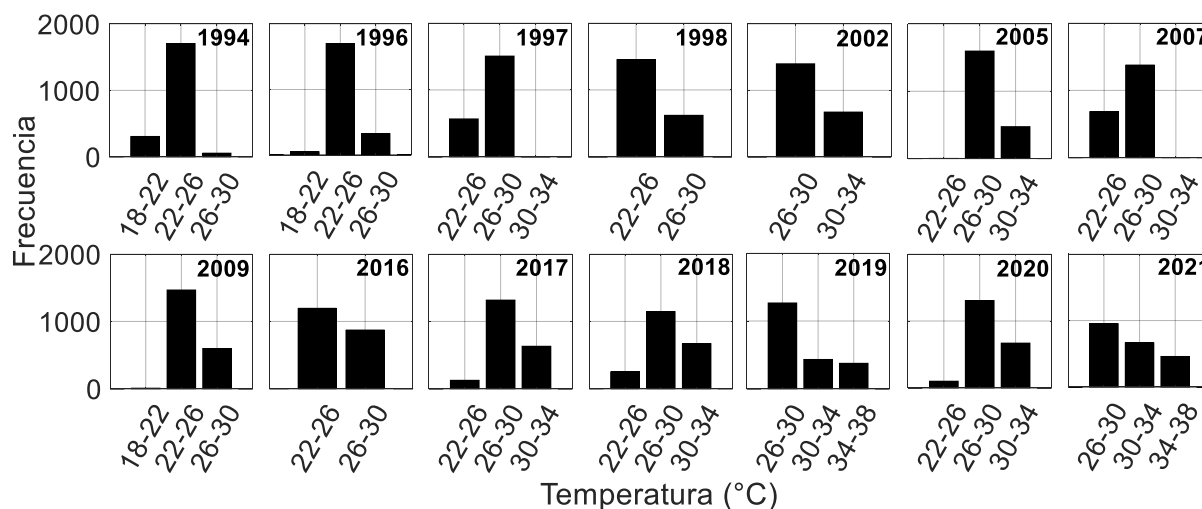


Figura 19. Frecuencias de la temperatura superficial de la arena de los pixeles del polígono de estudio en el mes de julio.

En el mes agosto las frecuencias de 30-34 °C se dispararon a partir de la década de 2010, así como en el año 2000, donde también se observaron frecuencias de hasta 34-38 °C y 38-42 °C. Para el mes de septiembre las frecuencias de 30-34 °C aumentaron a partir de mediados de la década de los 2000's y en el año 1999, año en el que además se detectaron frecuencias de 34-38 °C. En el mes de octubre hubo frecuencias de 30-34 °C desde los años 90's, las frecuencias de 34-38 °C incrementaron a partir de la década de los 2000's, y en los años 2004 y 2020 también se tuvieron frecuencias de 38-42 °C. En el mes de noviembre se encontraron frecuencias de 30-34 °C a partir de la década de los 2000's, que aumentaron en la década de los 2010's, además, a finales de esta década se tuvieron frecuencias de 34-38 °C. Finalmente, en el mes de diciembre predominaron frecuencias de 18-22 °C durante la década de los 90's y posteriormente, a partir de los 2000's, frecuencias de 22-26 °C y 26-30 °C, en los años 2006 y 2009 se registraron frecuencias de 30-34 °C (Anexo D).

7.2 Temperatura ambiental *in situ*

Los registros de la temperatura ambiental obtenidos mediante sensores digitales *in situ* mostraron que para el año 2009 la temperatura fluctuó entre los 18.1 y 39.4 °C, los meses más cálidos fueron julio y agosto con temperaturas entre los 28.6 y 39.4 °C, durante el mes de septiembre hasta el mes de octubre la temperatura osciló entre los 31 y 35 °C, pero a finales del mes de octubre hubo un descenso de la temperatura por debajo de los 25 °C debido a precipitaciones en la zona de estudio. Para el mes de noviembre la temperatura

estuvo entre los 25 y 31 °C y en el mes de diciembre se registraron temperaturas por debajo de los 28 °C, hasta los 18.1 °C. Cabe señalar que este año el corral de incubación no contaba con malla sombra que cubriera la totalidad del corral (Fig. 20).

En el año 2010 se registraron temperaturas entre los 8.4 y 36.9 °C, en este año ya se contaba con malla sombra que cubría la totalidad del corral de incubación. Entre el mes de julio y mediados del mes de octubre la temperatura osciló entre los 23 y 36 °C, posteriormente descendió, fluctuando entre los 10 y 36 °C en los meses de octubre y noviembre, mientras que en el mes de diciembre no se superaron los 25 °C. Para el año 2019 el corral de incubación también contaba con malla sombra y la temperatura fluctuó entre los 23 y 38 °C. La temperatura se registró entre 27 y 38 °C para los meses de agosto a octubre, y por debajo de los 28 °C para los meses de noviembre y diciembre. En el año 2020 la temperatura osciló entre los 8 y 37.1 °C, durante los meses de agosto a octubre se encontraron temperaturas entre los 18 y 37 °C, para el mes de noviembre la temperatura disminuyó por debajo de los 30° C, posteriormente, esto también ocurrió en el mes de diciembre donde se registraron valores alrededor de los 25 °C (Fig. 20).

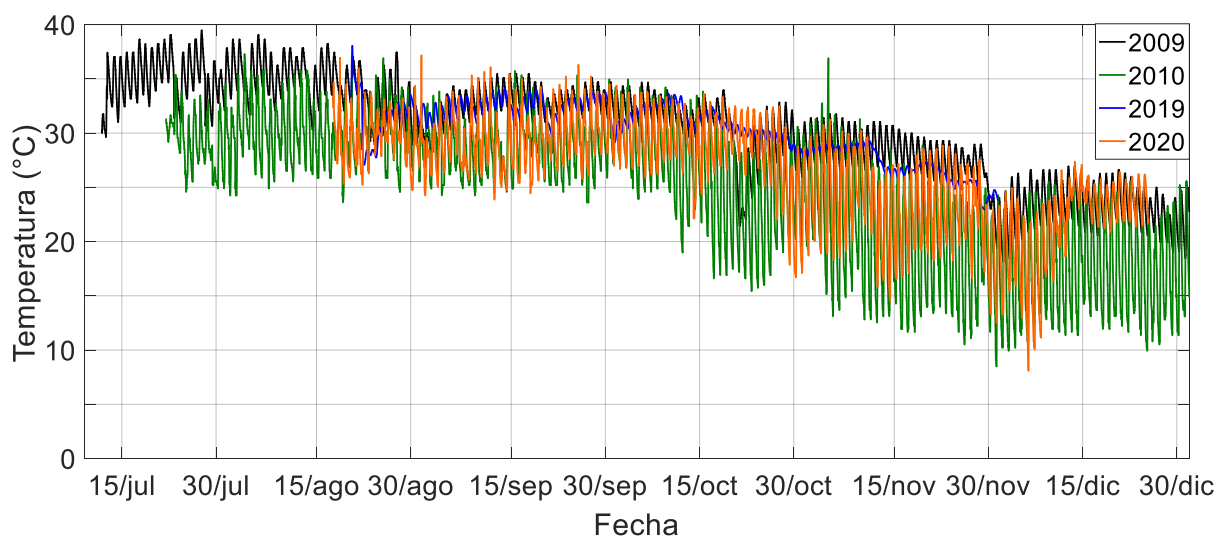


Figura 20. Registros de temperatura ambiental obtenida mediante sensores *in situ* (Sandoval, 2012, 2020).

Los promedios móviles mostraron que el año 2009 presentó mayores temperaturas, seguido del 2019 y posteriormente el 2020, por último el año con menores temperaturas fue el 2010. Para todos los años la temperatura osciló por arriba de los 28 °C desde el mes de julio hasta

el mes de octubre y a final de la temporada la temperatura descendió, con valores inferiores a los 25 °C (Fig. 21).

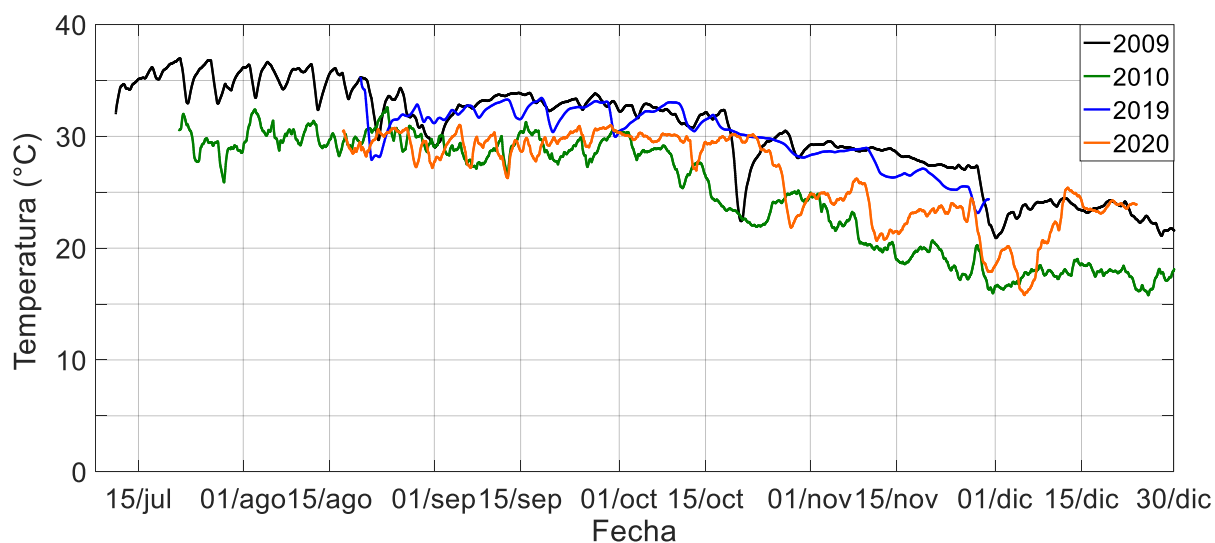


Figura 21. Promedios móviles de la temperatura ambiental *in situ*.

7.3 Comparación de datos satelitales e *in situ*

Se obtuvo el valor promedio de la temperatura superficial de la tierra de los pixeles que cubren

el corral de incubación del campamento de tortuguero Playa Ceuta. La Figura 22 muestra la ubicación de los dos pixeles que cubren el corral de incubación (a) y la temperatura superficial de la tierra (LST) obtenida con los satélites (b).

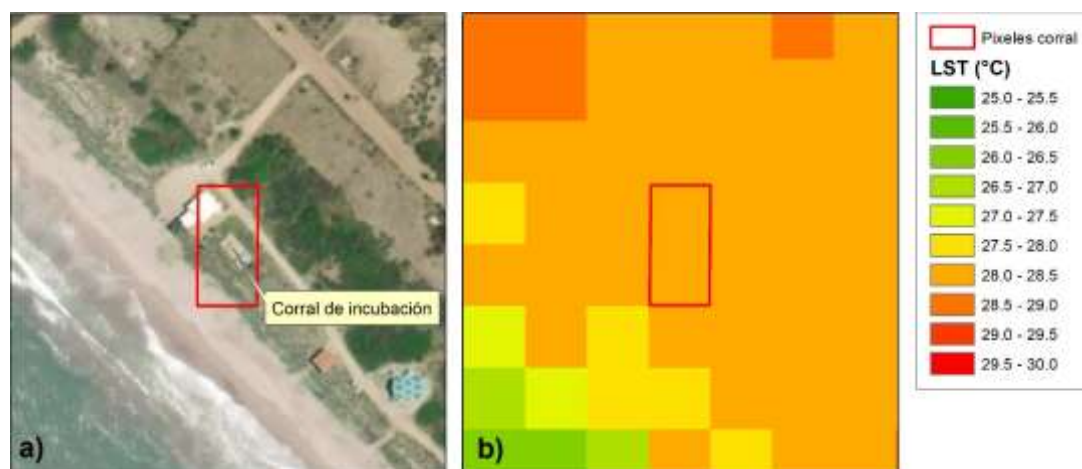


Figura 22. a) Ubicación de los pixeles que cubren el corral de incubación, b) Temperatura superficial de la tierra (LST) obtenida mediante imágenes de satélite.

En el mes de julio se encontró que a lo largo de las décadas analizadas la temperatura en el corral de incubación osciló entre 26.0-31.3 °C y esta aumentó por arriba de los 30 °C hasta el año 2019, así como en el año 2002, para el mes de agosto se estimaron temperaturas entre 24.3-31.6 °C donde se superaron los 30 grados en los años 2000, 2013 y 2019. En el mes de septiembre se tuvieron temperaturas entre 22.3-31.4 °C y sólo se superaron los 30 °C en el año 1999; para el mes de octubre la temperatura fluctuó entre 25.8-32.4 °C y en los años 1996, 1999, 2004, 2013, 2016, 2020 se encontraron temperaturas superiores a los 30 °C. En el mes de noviembre la temperatura osciló entre 25.4-31.3 °C y los 30 grados se superaron en los años 2009, 2017 y 2018; para el mes de diciembre las temperaturas estuvieron por debajo de los 28 °C, con valores entre los 21.7-27.6 °C (Fig. 23).

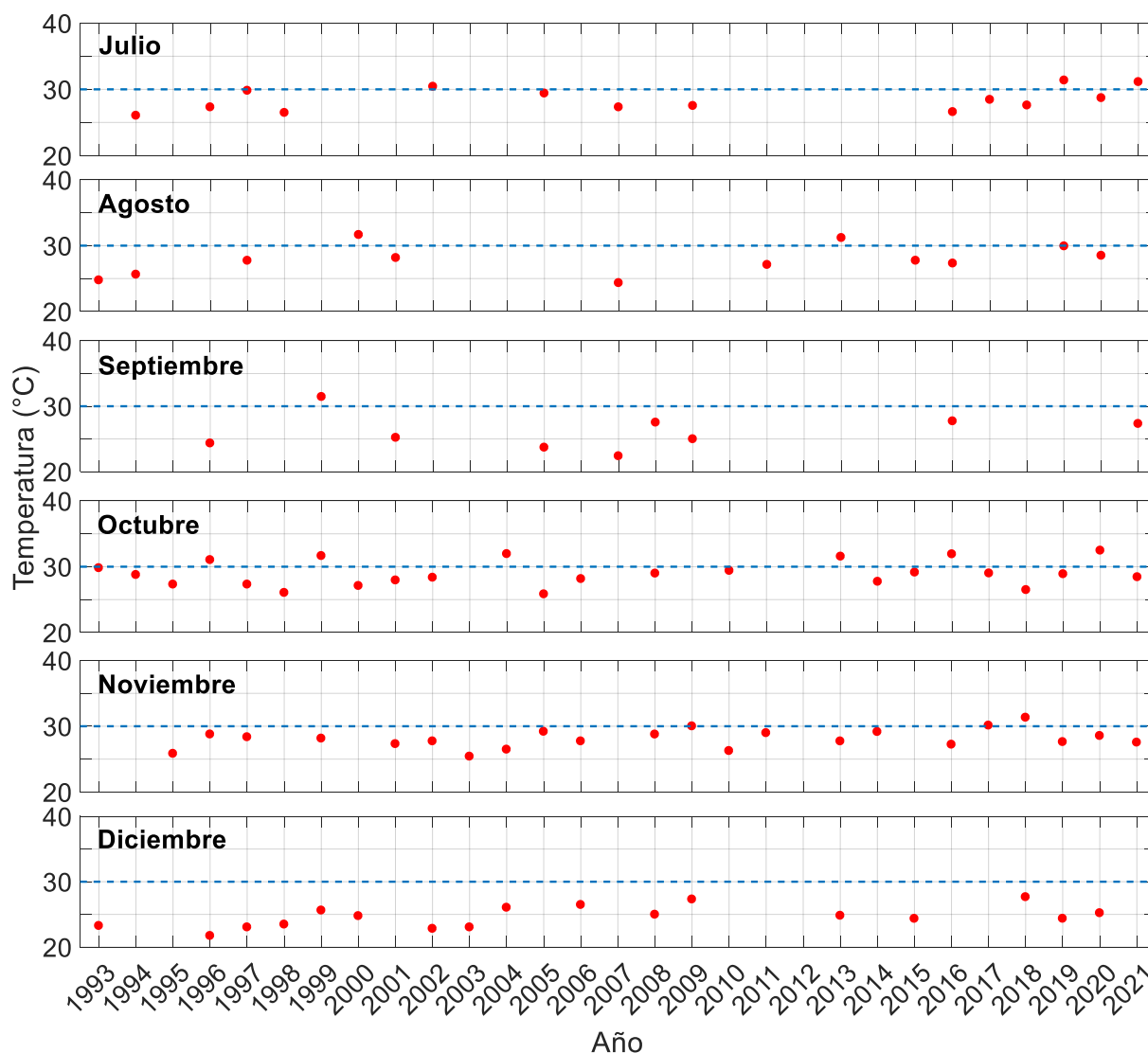


Figura 23. Temperatura promedio obtenida de los pixeles que cubren el corral de incubación de los diferentes meses y años analizados. La línea azul punteada indica 30 °C.

Posteriormente se compararon los valores de la temperatura superficial de la arena vs los registros de temperatura ambiental obtenidos con sensores *in situ* con fechas y horas más cercanas entre ellos (Tabla 7). Dado que los registros de temperatura ambiental *in situ* se obtuvieron en el corral de incubación del campamento tortuguero Playa Ceuta, y que este se cubre con píxeles de una imagen de satélite, se utilizaron los promedios temperatura de ambos píxeles de cada una de las imágenes comparadas.

Tabla 7. Fecha de las imágenes utilizadas para la comparación de datos de temperatura.

Año	Fecha	Hora de adquisición	
		Imagen de satélite	Registro <i>in situ</i>
2009	08 de septiembre	17:24	17:30
	11 de noviembre	17:25	17:30
	13 de diciembre	17:25	17:30
2010	29 de octubre	17:25	17:30
	30 de noviembre	17:25	17:30
2019	22 de octubre	17:35	16:50
	23 de noviembre	17:35	16:50
2020	21 de agosto	17:35	17:30
	08 de octubre	17:35	17:30
	25 de noviembre	17:35	17:30

Al comparar los datos de temperatura satelitales e *in situ* se encontró que en el año 2009 durante los meses de septiembre y noviembre la temperatura que registró el sensor *in situ* fue superior a la obtenida mediante imágenes de satélite, con una diferencia de 9.34 °C y 1.03 °C respectivamente, mientras que en el mes de diciembre la temperatura satelital fue 0.37 °C superior al registro del sensor. En el año 2010 la temperatura estimada con imágenes de satélite resultó superior a los registros *in situ*, con una diferencia de 1.54 °C en el mes de octubre y de 6.35 °C en el mes de noviembre (Fig. 24).

En el año 2019, se observó que en el mes de octubre la temperatura obtenida con el sensor *insitu* fue superior a la estimada mediante imágenes de satélite, con una diferencia de 1.18 °C, mientras que en el mes de noviembre resultó ser superior la temperatura satelital, con una diferencia de 2.39 °C. Mientras que en el año 2020, la temperatura registrada por el sensor en los meses de agosto y octubre resultó superior a la obtenida mediante imágenes de satélite, con un diferencia de 3.91 °C y 0.76 °C respectivamente, sin embargo, en el mes

de noviembre la temperatura satelital fue 1.67 °C superior al registro del sensor *in situ* (Fig. 24).

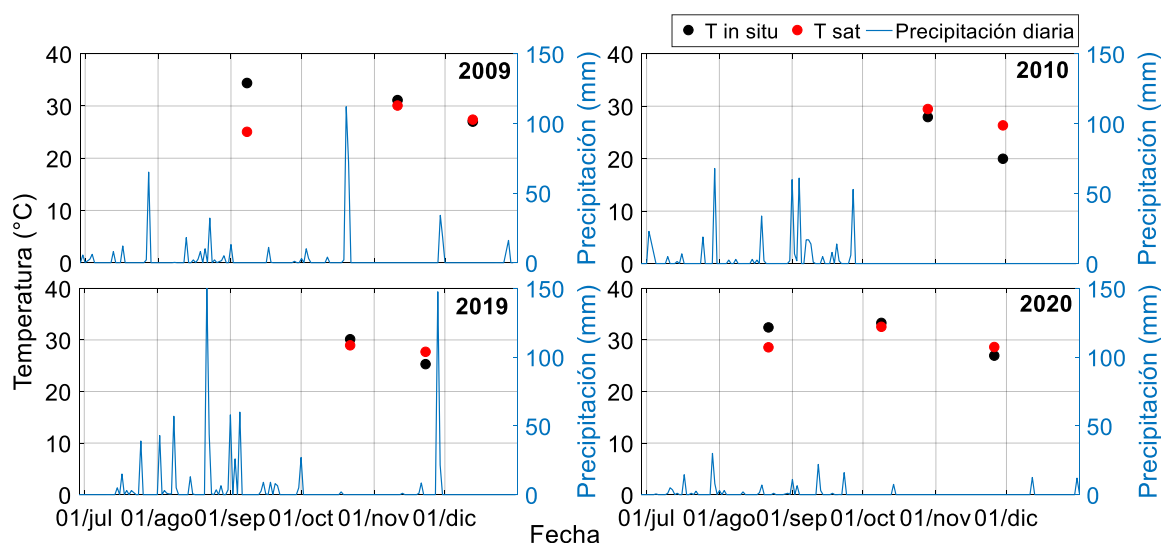


Figura 24. Comparación de datos satelitales e *in situ*. Se muestran los valores de temperatura comparados y la precipitación diaria registrada por la estación meteorológica La Cruz (CONAGUA, 2022).

7.4 Zonificación del área de estudio

Se decidió zonificar los 35 km que corresponden al área de anidación del campamento tortuguero Playa Ceuta a partir de la temperatura obtenida mediante imágenes de satélite. Se extrajeron todos los valores de temperatura por arriba de los 35 °C y por debajo de los 25 °C correspondientes al rango óptimo para el desarrollo de los embriones de tortugas marinas, sólo para los últimos años del periodo de estudio (2019-2021). Se encontró que la zona con pixeles mayores a 35 °C fue la zona norte del área de estudio en el mes de julio para los años 2019 y 2021, así como en el mes de octubre del año 2020. La zona con pixeles menores a 25 °C se ubicó al sur del polígono, cercana al área del corral de incubación, que se presentó en el mes de diciembre del año 2019 y en los meses de julio, agosto, noviembre y diciembre del año 2020 (Fig. 25).

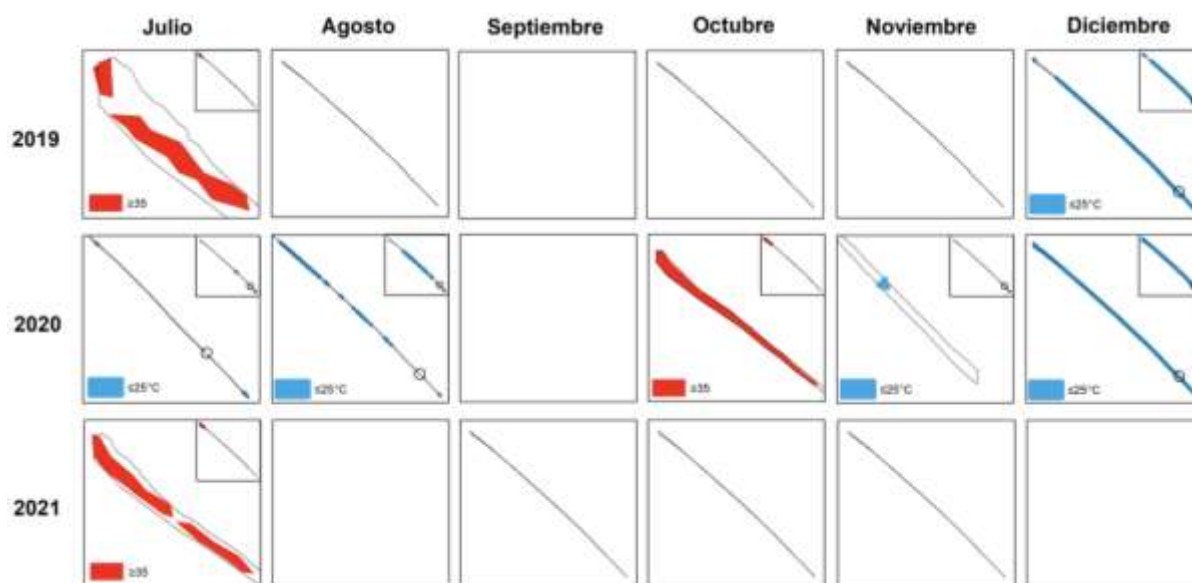


Figura 25. Mapas de zonificación del área de estudio de acuerdo con la temperatura superficial de la arena. En azul se muestran las zonas no viables con temperaturas por debajo de los 25 °C, en rojo las zonas no viables con temperaturas superiores a los 35 °C. El círculo negro representa la ubicación del corral de incubación del campamento tortuguero Playa Ceuta, Sin.

7.5 Análisis estadísticos

7.5.1 Temperatura superficial de la arena

Todos los valores de la temperatura obtenidos mediante imágenes de satélite fueron normales ($p < 0.05$). Por lo que la prueba ANOVA indicó diferencias significativas en la temperatura superficial de la arena en todos los meses analizados, debido a que, en todos los casos el valor de F fue superior al valor de F crítico ($p < 0.05$; Tabla 8) por lo que se rechazó la hipótesis nula y se concluyó que hay diferencia entre las medias comparadas. Por lo tanto, existe variación de la temperatura superficial de la arena a lo largo de los años analizados.

Tabla 8. Resultados del análisis ANOVA ($p < 0.05$) de los valores de temperatura superficial de la arena por mes.

Mes	F	F crítico	p
Julio	3084.4	1.7	0
Agosto	5685.6	1.7	0
Septiembre	5364.8	1.9	0
Octubre	2944.9	1.5	0
Noviembre	2352.7	1.5	0
Diciembre	4730.0	1.6	0

Debido a que al menos una media mensual era distinta, se aplicó la prueba de Tukey para comparar todos los años, la cual mostró diferencias significativas en todos los meses analizados, los resultados para cada mes se reportan en el Anexo E.

7.5.2 Temperatura ambiental *in situ*

Los valores de temperatura ambiental obtenidos mediante sensores *in situ* fueron normales y la prueba ANOVA mostró diferencias entre las medias en todos los meses analizados, debido a que en todos los casos el valor de F fue superior al valor de F crítico ($p < 0.05$; Tabla 9), y por lo tanto, se rechazó la hipótesis nula, es decir, que existe variación de la temperatura ambiental en los años analizados.

Tabla 9. Resultados del análisis ANOVA ($p < 0.05$) de valores de temperatura ambiental *in situ* por mes.

Mes	F	F crítico	p
Julio	2099.1	3.8	0
Agosto	953.2	2.6	0
Septiembre	868.4	2.6	0
Octubre	602.2	2.6	0
Noviembre	1154.6	2.6	0
Diciembre	692.7	2.6	0

Debido a que al menos una de las medias mensuales resultó distinta, se aplicó la prueba de Tukey para comparar entre años, la cual indicó que las medias de temperatura fueron diferentes significativamente en todos los meses, con excepción de las medias de los años 2009 y 2019 en el mes de octubre, así como en los años 2019 y 2020 en el mes de diciembre. Esto indica que aunque en el año 2019 la presencia de malla sombra cubría la totalidad del corral de incubación, la temperatura en este mes resultó estadísticamente igual a la registrada para este mes en el año 2009 donde no había malla sombra. Además, en el año 2020 aunque se presentaron temperaturas más bajas respecto a las registradas en el año 2019, en el mes de diciembre estas resultaron similares (Anexo F).

7.5.3 Comparación de datos satelitales e *in situ*

El porcentaje de error relativo (%ER) y el error cuadrático medio (RMS) fueron mayores para el mes de septiembre en el año 2009 (%ER=27.2, RMS=6.6 °C), cuando el corral de incubación no se cubría con malla sombra y se presentaron precipitaciones; así como en el mes de noviembre del año 2010 (%ER=31.9, RMS=4.4 °C), donde hubo un descenso importante de la temperatura del aire, para el resto de las comparaciones se reportaron %ER menores a 12 y un RMS entre 0.2-2.7 °C, esto indicó una buena precisión en los datos obtenidos mediante técnicas de teledetección (Tabla 10).

Tabla 10. Parámetros estadísticos de la comparación de la temperatura ambiental *in situ* ($T_{in\ situ}$) y la temperatura superficial de la arena obtenida mediante imágenes de satélite (T_{sat}).

Año	Mes	$T_{in\ situ}$	T_{sat}	$T_{in\ situ} - T_{sat}$	%ER	RMS (°C)
2009	Septiembre	34.31	24.9	9.34	27.2	6.6
	Noviembre	31.03	30.0	1.03	3.3	0.7
	Diciembre	26.93	27.3	-0.37	1.3	0.2
2010	Octubre	27.84	29.38	-1.64	5.5	1.0
	Noviembre	19.90	26.25	-6.35	31.9	4.4
2019	Octubre	30.05	28.87	1.18	3.9	0.8
	Noviembre	25.22	27.61	-2.39	9.4	1.6
2020	Agosto	32.39	28.48	3.91	12.0	2.7
	Octubre	33.22	32.46	0.76	2.2	0.5
	Noviembre	26.87	28.54	-1.67	6.2	1.1

8. DISCUSIÓN

La teledetección es la ciencia que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre a partir de sensores aéreos o espaciales. Entre los satélites artificiales para estudios ambientales se tiene la serie Landsat, los cuales transmiten información a la tierra desde los años 80`s (Chuvienco, 2019), no obstante, una de las limitaciones para el uso de estas imágenes es la presencia de nubes. Las nubes producen una alta reflectividad y dispersión en los intervalos del infrarrojo cercano y medio en el espectro visible, así como una baja temperatura estimada en la región del infrarrojo térmico (Ormeño-Villajos, 2006).

Las regiones espectrales de las bandas de los sensores Landsat (visible, infrarrojo térmico) no atraviesan las nubes y por lo tanto el valor de la temperatura superficial terrestre (LST) que registra el sensor corresponde al de las nubes (Li *et al.*, 2023). Este problema de nubosidad es común en diferentes partes del mundo, Stubenrauch *et al.* (2013) reportan hasta un 68 % de nubosidad diaria en el mundo, por lo que resulta complicado evitarlo.

Para disminuir el efecto de la nubosidad en los valores de la LST existen tres métodos: 1) Método de regresión estadística, que consiste en sustituir los valores de la LST de las nubes por coeficientes que resulten de un modelo de regresión entre la LST, el NDVI y un modelo digital de elevación (Zhang *et al.*, 2020); 2) Reconstrucción espacio temporal, esta consiste en sustituir los valores de la LST que tienen las nubes con los valores de la LST de píxeles adyacentes que no tienen nubes, simulando un cielo despejado en la zona; 3) Uso de imágenes con resolución espectral en la región del microondas (RADAR), estas imágenes pueden penetrar las nubes y proporcionar valores de la LST, sin embargo, las imágenes de RADAR tienen algunas deficiencias, por ejemplo, una baja resolución espacial (5000 metros, METEOSAT), por lo que se obtienen valores de la LST con menor precisión (Hecht, 2002).

Otro método para eliminar el efecto de las nubes en la estimación de la LST es el algoritmo Fmask, propuesto por Zhu y Woodcock (2012), en el cual se identifican los píxeles en una imagen que representan nubes y se eliminan, para ello se buscan los píxeles más brillantes para etiquetarlos e identificarlos como píxeles contaminados con nubes, así como los píxeles más oscuros que representan sombras de nubes. Sin embargo, este algoritmo puede presentar ciertas dificultades en la detección de nubes cuando existen objetos muy brillantes

en la cubierta terrestre, como techos de edificios, nieve o cobertura de hielo, algunos cuerpos de agua, dunas de arena y algunas playas por la espuma a lo largo de la costa, asimismo, mediante esta técnica resulta difícil detectar nubes delgadas, así que podrían ser omitidas y aún representar menores temperaturas (Foga *et al.*, 2017).

En este estudio la presencia de nubes en las imágenes de satélite resultó un inconveniente, debido a que se detectaron valores de la LST de la arena inferiores a los 0 °C, y en vista de las limitaciones de cada uno de los métodos anteriormente descritos, se decidió eliminar de los análisis a todas las imágenes que contenían nubes y así disminuir el error en el cálculo de la temperatura superficial de la arena.

Además, al determinar la temperatura superficial en una zona costera es posible que se consideren píxeles correspondientes a la superficie del mar debido a que la zona está expuesta a los cambios de marea y si no se omiten los píxeles cercanos a la costa los valores de temperatura resultarán inferiores (Roth *et al.*, 1989), esto implica considerar la variación de la línea de costa.

En este sentido, se ha reportado que la erosión costera ha provocado pérdida en la línea de costa en diferentes playas del mundo en las últimas décadas (Shlachet *et al.*, 2007). Estudios cercanos al área de estudio, e. g. Valderrama-Landeros *et al.* (2020) han reportado que en el complejo Marismas Nacionales, Nayarit, en el Pacífico mexicano, hubo erosión de entre 0.1 y hasta 9.9 m en la playa, durante el periodo de 1970-2019, además, registraron una considerable pérdida de la línea de costa en la boca del canal Cautla de hasta 1250 m y el mayor registro de erosión en el periodo 2000-2005 debido a la presencia del huracán Kenna en 2002. También se ha reportado en la zona turística de Mazatlán (se localiza a 80 km al sur del área de estudio) una reducción mayor a los 60 metros, causada por el aumento exponencial de la infraestructura para el turismo (Aguilar, 2021).

Sin embargo, no hay una investigación sobre la dinámica de la línea de costa en el área de estudio, el polígono utilizado fue el mismo en las últimas tres décadas, este cubre sólo la porción de arena a lo largo de los 35 km de playa, pero se detectó mediante las imágenes de satélite que la zona más vulnerable es la zona norte, en Boca Cospita, ya que se observó que esta zona se inundaba a lo largo de los años estudiados, por lo que se excluyó del estudio.

Respecto a los efectos de la pérdida de la línea de costa y los valores de la temperatura superficial de la arena, Rahman *et al.* (2017) mencionan que en las regiones costeras de Arabia Saudita los valores de la LST aumentaron drásticamente en las últimas dos décadas y predicen que para el 2026 la temperatura promedio podría superar los 41 °C, debido a la disminución de la línea de costa causada por la erosión que ha sido provocada por el aumento de las áreas edificadas.

La pérdida de playa en las zonas de anidación de tortugas marinas ya se ha reportado por otros autores, e. g. Maneja *et al.* (2021) con imágenes aéreas y de satélite determinaron en zonas de anidación del Golfo pérsico una reducción en el ancho de playa de hasta 253 m, de 1965 al 2017. Las causas que estos autores reportan son: el aumento del nivel del mar, tormentas de polvo, olas que superaban los 10 metros y la desertificación. Por lo que, además de analizar la temperatura de la arena que interviene en la incubación de crías de tortugas marinas, resulta relevante analizar si el ancho de playa en las áreas de anidación ha disminuido.

De acuerdo con la hipótesis planteada en esta tesis, a través del análisis de la temperatura superficial de la arena estimada mediante imágenes satelitales se encontró que esta ha aumentado en todos los meses de la temporada de anidación de las últimas décadas (1993-2021), en el área de anidación de tortugas marinas del campamento tortuguero Playa Ceuta, Sinaloa. Esto se observó incluso en los meses de invierno, donde las temperaturas son bajas.

Inclusive, se ha reportado que la temperatura superficial de la arena ha aumentado en otras partes del mundo, como lo reportan Das y Das (2020), quienes mediante imágenes de los satélites Landsat 5 y 8 analizaron la LST en la región de Bengala occidental, India, de los años 2000 y 2018. Ellos encontraron que la temperatura de la arena aumentó tanto en el verano (0.5 °C por año) como en el invierno (0.3 °C por año), siendo abril el mes más cálido en ambos años. Por otro lado, Vancutsem *et al.* (2010), encontraron que los valores de la LST versus los provenientes de estaciones meteorológicas varían hasta 8 grados prácticamente para cualquier estación del año. Sin embargo, las imágenes satelitales utilizadas en este estudio, del satélite MODIS, tienen una resolución espacial de 1 km, el cual generaliza más los valores de la LST que los provenientes de satélites Landsat, que tienen una resolución de 100 m (Weng *et al.*, 2014).

Por otro lado, la temperatura ambiental registrada con sensores *in situ* en el corral de incubación osciló entre los 8.4 y 39.4 °C, el año más frío fue el 2010 y el más caliente aparte del año 2009 (año en que no había malla sombra cubriendo la totalidad del corral de incubación) fue el 2019 (Fig. 20 y 21), las temperaturas más bajas se registraron durante los meses de noviembre y diciembre, mientras que las más altas en los meses de julio y agosto.

Esto también ha sido reportado por Sandoval (2012), que estimó la proporción sexual en nidos del campamento tortuguero Playa Ceuta, Sin. a partir de registros de temperatura ambiental y de la superficie de la arena obtenida mediante sensores digitales *in situ* durante los años 2009 y 2010, donde se reportó un sesgo hacia hembras desde los meses de julio a noviembre. Por lo que, con los datos de temperatura ambiental analizados en esta investigación, se esperaría una proporción sexual sesgada hacia hembras desde el mes de julio hasta mediados del mes de octubre.

Además, durante los cuatro años analizados en este estudio los sensores *in situ* mostraron que la temperatura ambiental a inicios y final de la temporada de anidación se encuentra fuera del rango óptimo para el desarrollo de los embriones de las tortugas marinas, que es de 25 a 35 °C (Ackerman, 1997; Howard *et al.*, 2014), por lo que se esperaría una alta mortalidad de crías en el área de estudio en los meses de julio-agosto y noviembre-diciembre. Lo que también fue descrito por Sandoval (2012) para los años 2009 y 2010.

En cambio, las temperaturas en el corral de incubación obtenidas por imágenes de satélite mostraron que octubre fue el mes con valores cercanos o por arriba de los 30 °C, seguido del mes de noviembre, en los diferentes años analizados, meses en los que aparentemente hay menor cantidad de lluvias en la temporada así como menor cobertura de nubes. En ningún año se registraron temperaturas por encima del rango óptimo de incubación, pero sí por debajo de este, en el mes de diciembre.

Pese a que no existen trabajos previos que estimen la temperatura de la arena en una zona de anidación de tortugas marinas, que además los validen con datos *in situ*, sí se pueden identificar algunos casos en los que se contrasta la LST obtenida mediante imágenes Landsat con la temperatura ambiental de estaciones meteorológicas. Por ejemplo, Avdan y Jovanovska (2016) estimaron la LST de las ciudades canadienses de Ontario y Moncton en

2015 utilizando imágenes Landsat 8 y la compararon con la temperatura del aire de la misma fecha, hora y lugar de las 16 estaciones meteorológicas. Ellos encontraron diferencias de entre 0.2 y 7.8 °C entre la LST y la temperatura del aire.

Asimismo, Mukherjee y Singh (2020) compararon los valores de la LST en las ciudades indias de Surat y Bharuch obtenidos mediante imágenes de los satélites Landsat 5 y 8 de los años 1998, 2008 y 2016, con la temperatura del aire de estaciones meteorológicas que se obtuvieron por la NOAA; y reportaron diferencias de temperatura de entre 4 y 6.8 °C, siendo siempre superiores los valores de la LST. Además, reportaron un aumento de la LST de cerca de 2.4 °C por década en la ciudad de Siurat y de cerca de 2.1 °C por década en la ciudad de Bharuch.

En este trabajo se encontró que en el mes de septiembre del año 2009 los valores de la temperatura superficial de la arena fueron casi 10 grados menores vs los datos *in situ* (Tabla 10), estas diferencias se pueden deber a que el corral de incubación ese año no contaba con malla sombra, por lo que el sensor *in situ* estuvo desprotegido y expuesto a la radiación directa, y debido a las lluvias temporales que propiciaron mayor humedad de la arena, así como la cobertura de nubes generada previo al paso del Huracán Rick el 15 de octubre del 2009 (Cangialosi y Avila, 2009). No obstante, se reportaron porcentajes de error relativo bajos en la mayoría de los casos, por lo tanto, estimar la temperatura superficial de la arena con imágenes de satélites a falta de recursos para colocar sensores *in situ* a lo largo de áreas de anidación es una alternativa útil para monitorear la temperatura a lo largo de los meses y años, además sin ningún costo.

Aunque no se ha zonificado el área de estudio de acuerdo con su temperatura, una primera zonificación la realizaron Sosa-Cornejo *et al.* (2019), en este trabajo se evaluaron las características físicas y químicas de la arena en Playa Ceuta, Sinaloa para establecer su relación con la elección del sitio de anidación de la tortuga golfina (*L. olivacea*). Ellos tomaron muestras del sustrato de los años 2000 y 2001 entre los meses de julio-diciembre, encontraron diferencias en el tamaño de grano a lo largo de los 35 km de playa y reportaron que existe un gradiente de tamaño de grano de sur a norte de la playa, así como mayor frecuencia de anidación en las zonas con menor tamaño de grano.

Para entender las implicaciones del tamaño de grano en la temperatura, Mortimer (1990) y Chávez (2013) mencionan que en la arena gruesa existe más espacio intersticial entre los granos, por lo que es posible una mayor difusión de fluidos, es decir, que la arena gruesa permite que se escape el vapor de agua más fácilmente y se tienda a elevar la temperatura. Por otro lado, en arenas finas la humedad se concentra debido a que existe menos espacio intersticial y por lo tanto hay un intercambio de fluidos lento, limitando la difusión de agua, resultando en la saturación de los espacios intersticiales, que implicaría temperaturas bajas.

Finalmente, en este trabajo se zonificó el área de estudio dependiendo la temperatura superficial de la arena obtenida utilizando imágenes de satélite. Aunque la temperatura superficial de la arena no representa la temperatura de incubación de los nidos, de acuerdo con Sandoval (2008) conforme aumenta la profundidad hay menor variación de temperatura, además reporta diferencias de menos de un grado entre los valores de temperatura registrados con sensores *in situ* colocados en la superficie (10 cm) y a 20, 30 y 40 cm de profundidad. Por lo que la propuesta de zonificación fue útil para identificar los pixeles con temperaturas no viables, de acuerdo con la literatura (Ackerman, 1997; Howard *et al.*, 2014), es decir, aquellos en que la temperatura podría representar la mortalidad de crías.

Con ello se observó que en los pixeles con temperaturas por arriba de los 35 °C, se encontraba la selva baja espinosa caducifolia, con características de aridez con calizas; y en los pixeles con temperatura por debajo de los 25 °C, se encontraba la vegetación halófila hidrófila y manglar, donde hay aportación de agua salina, sobre suelos generalmente arenosos con altas concentraciones de sales y que en algún periodo están sujetas a grandes aportaciones de humedad (INEGI, 2017). Aunque en esta zonificación sólo se obtuvo en el polígono de la arena, tal vez se ve afectado por la cercanía del tipo de vegetación respectivo con los pixeles de la arena. Así mismo, en la zona norte se encuentra un mayor tamaño de grano (Sosa-Cornejo *et al.*, 2019), por lo que debería de tomarse en cuenta estos factores para evitar la mortalidad de las crías o para el movimiento del corral de incubación (Fig. 26).

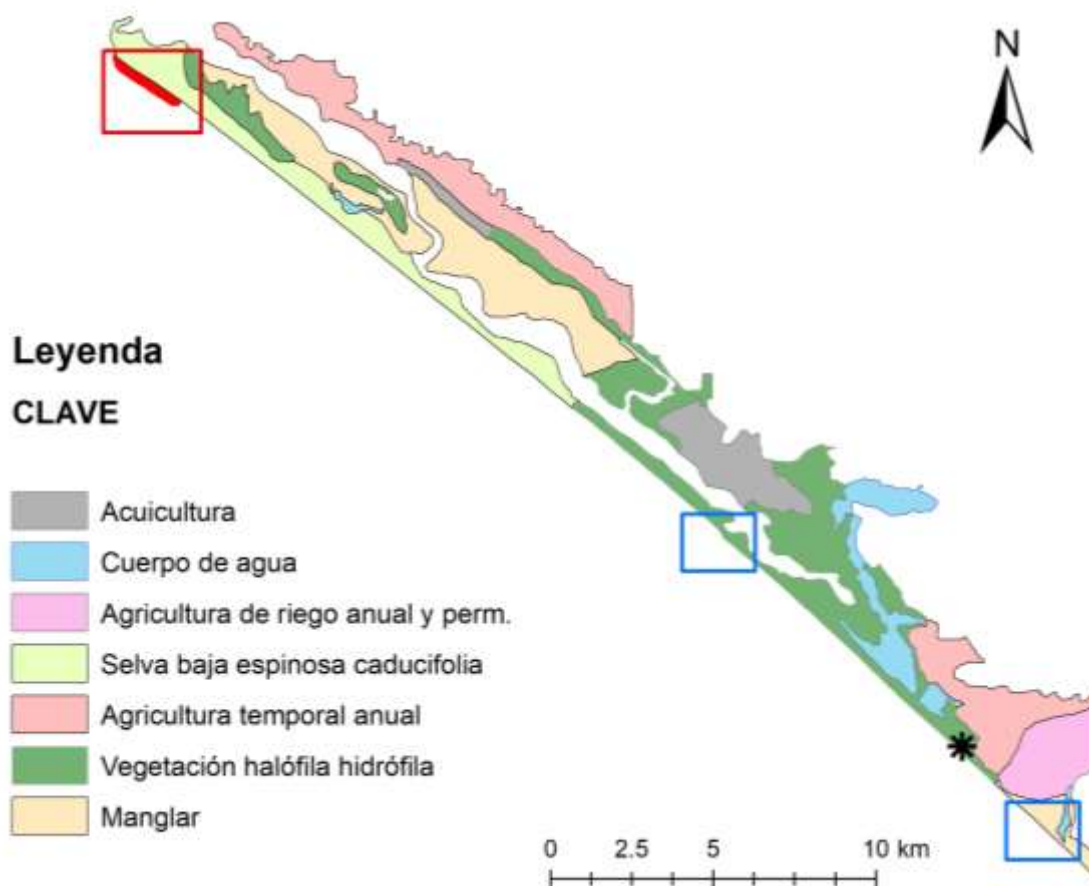


Figura 26. Área de anidación del campamento tortuguero Playa Ceuta, Sin. junto con la capa de uso de suelo y vegetación, Serie 7 (INEGI,2021). El cuadro en rojo indica los pixeles con LST de la arena por arriba de los 35 °C; el cuadro en azul pixeles con temperatura menor a 25 °C, obtenidos por imágenes de Landsat 8 de los años 2019, 2020 y 2021; el asterisco corresponde al corral de incubación.

9. CONCLUSIONES

- El uso de imágenes de satélite resultó útil para estimar la temperatura superficial de la arena en el área de anidación de tortugas marinas del campamento tortuguero Playa Ceuta, Sinaloa, sin embargo, la presencia de nubes limitó la cantidad de imágenes que pudieron ser utilizadas.
- Se detectó mediante las imágenes de satélite que la zona norte, en Boca Cospita, se inundaba a lo largo de los años estudiados.
- Se encontró que la temperatura superficial de la arena ha estado aumentando en los últimos 28 años en todos los meses de la temporada de anidación, siendo octubre el mes más cálido y diciembre el más frío.
- La temperatura ambiental registrada mediante sensores *in situ* aumentó en los años analizados, a pesar de la colocación de malla sombra para cubrir la totalidad del corral de incubación a partir del año 2010.
- Se encontró una buena precisión de los datos de temperatura obtenidos mediante técnicas de teledetección gracias al contraste con los registros de temperatura ambiental *in situ*.
- Se logró zonificar el área de estudio de acuerdo con su temperatura, lo que permitió identificar las zonas no viables para el desarrollo de las crías en los últimos tres años, siendo la zona norte la que presentó temperaturas mayores al rango óptimo para el desarrollo de las crías (25-35 °C), mientras que la zona sur representó temperaturas por debajo de este.

9.1 Recomendaciones

- Se sugiere utilizar sólo imágenes de satélite sin cobertura de nubes para evitar errores en la estimación de la temperatura superficial de la arena en áreas de anidación de tortugas marinas.
- Debe delimitarse el polígono de estudio de forma en que se omitan píxeles que representen la superficie del mar o que sean susceptibles de ser inundados por los cambios de marea, por lo que también es importante estudiar la dinámica de la línea de costa en el área de estudio a lo largo de los años analizados.
- Existen zonas del área de estudio que no son viables para el desarrollo de las crías, por lo que se sugiere tomar en cuenta para evitar la mortalidad de las crías o para el movimiento del corral de incubación.
- Se desconoce cómo ha fluctuado la temperatura de la arena en otras áreas de anidación de tortugas marinas, por lo que sería útil analizar la temperatura superficial de la arena con imágenes de satélites a falta de recursos para colocar sensores *in situ*.
- El ANP Santuario Playa Ceuta no cuenta con un plan de manejo, a pesar de albergar especies en alguna categoría de protección dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010, ser considerado un sitio RAMSAR, así como un Sitio de importancia regional por la Red Hemisférica de Reservas para Aves playeras. Por lo que es necesario evaluar esta y otras variables ambientales, así como los posibles efectos en la biodiversidad del área que permitan realizar un diagnóstico y propuesta de plan de manejo para la conservación.

10. LITERATURA CITADA

- Ackerman, R. A. (1997). The nest environment and the embryonic development of sea turtles. En: Lutz, P. L. y Musick, J. A. (Ed.). *The Biology of Sea Turtles*. CRC Press, Boca Ratón, Florida, pp. 83-106.
- Aguilar, P. A. (2021). Evaluación de la opresión costera en Mazatlán, Sinaloa. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México. Mazatlán, Sinaloa.
- Aguirre Gómez, R. (2001). Los mares mexicanos a través de la percepción remota. Instituto de Geografía, UNAM. Plaza y Valdés, México, D.F.
- Aryal, A., Shakya, B., Maharjan, M., Talchabhadel, R. y Thapa, B. (2021). Evaluation of the land surface temperature using satellite images in Kathmandu Valley. *Nepal Journal of Civil Engineering*, 1: 1-10. doi:10.3126/njce.v1i1.43368.
- Arzola-González, J. F. (2007). Humedad y temperatura en nidos naturales y artificiales de tortuga golfina *Lepidochelys olivacea* (Eschsholtz 1829). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 42(3): 377-383. doi:10.4067/S0718-19572007000300017.
- Avdan, U. y Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*, 2016 (1480307). doi:1155/2016/1480307.
- Barreto, Á., Arbelo, M., Núñez-Casillas, L., Hernández-Leal, P., González-Calvo, A. y Alonso-Benito, A. (2009). Estimación de la emisividad espectral con datos térmicos ASTER de la Isla de Tenerife. IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, IGARSS 2009, University of Cape Town, South Africa.
- Becker, F. y Li, Z. (1990). Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, 32(1): 17-33. doi:10.1016/0034-4257(90)90095-4.
- Beebee, T. J. (1995). Amphibian breeding and climate. *Nature*, 374: 219-220. doi:10.1038/374219a0.
- Binckley, C. A., Spotila, J. R., Wilson, K. S. y Paladino, F. V. (1998). Sex determination and sex ratios of Pacific leatherback turtles, *Dermochelys coriacea*. *Copeia*, 1998(2): 291-300. doi:10.2307/1447425.
- Binhammer, M. R., Beange, M. y Arauz, R. (2019). Sand temperature, sex ratios, and nest success in olive ridley sea turtles. *Marine Turtle Newsletter*, 159: 5-9.
- Brown, C. y Harder, C. (2016). *The ArcGIS Imagery Book: Nueva vista. Nueva visión*. Esri Press, Redlands, California.
- Brown, J. L., Li, S.-H., y Bhagabati, N. (1999). Long-term trend toward earlier breeding in an American bird: A response to global warming? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(10): 5565–5569. doi:10.1073/pnas.96.10.5565.
- Bull, J. J., Moon, R. G. y Legler, J. M. (1974). Male heterogamety in kinosternid turtles (genus *Staurotypus*). *Cytogenetic and Genome Research*, 13(5): 419-425. doi:10.1159/000130295.
- Bull, J. J. y Vogt, R. (1979). Temperature-dependent sex determination in turtles. *Science*, 206(4423): 1186–1188. doi:10.1126/science.505003.
- Bull, J. J. (1980). Sex determination in reptiles. *The Quarterly Review of Biology*, 55: 3-21.
- Bull, J. J., Vogt, R. C. y McCoy, C. J. (1982). Sex determining temperatures in turtles: A geographic comparison. *Evolution*, 36(2): 326-332. doi:10.2307/2408051.
- Bull, J. J. (1985). Sex determining mechanisms: An evolutionary perspective. *Experientia*, 41(10): 1285-1296. doi:10.1007/bf01952071.

- Bull, J. J. (1987). Temperature-sensitive periods of sex determination in a lizard: Similarities with turtles and crocodilians. *Journal of Experimental Zoology*, 241(1): 143-148. doi:10.1002/jez.1402410118.
- Calderón-Peña, R., Betancourt-Ávila, R., Rodríguez-Fajardo, E., Martínez-González, Y. y Azanza-Ricardo, J. (2020). Sex ratio of the green sea turtle *Chelonia mydas* (Testudines: Cheloniidae) hatchlings in the Guanahacabibes Peninsula, Cuba. *Revista de Biología Tropical*, 68(3): 777-784. doi:10.15517/rbt.v68i3.39033.
- Cangialosi, J. P. y Avila, L. (2009). Tropical cyclone report hurricane Rick (EP202009) 15-21, October 2009. National Hurricane Center, NOAA. USA.
- Carlson, T. y Ripley, D. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area Index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3): 241-252. doi:10.1016/S0034-4257(97)00104-1.
- Carr, J. L. y Bickham, J. W. (1981). Sex chromosomes of the Asian black pond turtle, *Siebenrockiella crassicollis* (Testudines: Emydidae). *Cytogenetic and Genome Research*, 31(3): 178-183. doi:10.1159/000131644.
- Chander, G., Markham, B. L. y Helder, D. L. (2009) Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113: 893-903. doi:10.1016/j.rse.2009.01.007.
- Charnier, M. (1966). Action de la température sur la sex-ratio chez l' embryon d' *Agama agama* (Agamidae, Lacertilien). *Comptes Rendus des Séances de la Société de Biologie*, Paris, 160: 620-622.
- Chávez Flores, T. G. (2013). Influencia de las variables climáticas sobre la nidificación, éxito de eclosión y proporción de sexos de neonatos de *Chelonia mydas* en Isla Cozumel, Quintana Roo, México. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, México, D. F.
- Chuvieco, E. (1992). Teledetección, S.I.G. y cambio global. *Geographicalia*, 29(1992): 33-56. doi:10.26754/ojs_geoph/geoph.1992291833.
- Chuvieco, E. (2019). Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. Digital Reasons, Barcelona, España.
- Ciofi, C. y Swingland, I. R. (1997). Environmental sex determination in reptiles. *Applied Animal Behaviour Science*, 51 (3-4): 251-265. doi:10.1016/S0168-1591(96)01108-2.
- Cohen, C. J. (2000). Early history of remote sensing. *Proceedings 29th Applied Imagery Pattern Recognition Workshop*, 3-9. doi:10.1109/AIPRW.2000.953595.
- CONANP (2018a). Estudio previo justificativo para la modificación de la declaratoria de Santuarios de playas tortugueras. SEMARNAT, México, 281 p.
- CONANP (2018b). Ficha SIMEC (Sistema de información, monitoreo y evaluación para la conservación) del Santuario Playa Ceuta, Elota, Sinaloa. Disponible en: <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=11®=2> [consulta: 20 de marzo 2022].
- Cree, A., Thompson, M. y Daugherty, C. (1995). Tuatara sex determination. *Nature*, 375: 543. doi:10.1038/375543a0.
- Crick, H., Dudley, C., Glue, D. y Thomson, D. (1997). UK birds are laying eggs earlier. *Nature*, 388: 526. doi:10.1038/41453.
- Crick, H. y Sparks, T. (1999). Climate change related to egg-laying trends. *Nature*, 399: 423. doi:10.1038/20839.
- Dalrymple, J. H., Hampp, J. C. y Wellins, D. J. (1985). Male-biased sex ratio in a cold nest of a hawksbill sea turtle *Eretmochelys imbricata*. *Journal of Herpetology*, 19(1): 158-159.
- Das, M. y Das. A. (2020). Assessing the relationship between local climatic zones (LCZs) and land surface temperature (LST). A case study of Sriniketan-Santiniketan planning area (SSPA), West Bengal, India. *Urban Climate*, 32: 100591. doi:10.1016/j.uclim.2020.100591.

- Davis, R. y Callahan, J. R. (1992). Post-pleistocene dispersal in the Mexican vole (*Microtus mexicanus*): an example of an apparent trend in the distribution of southwestern mammals. *The Great Basin Naturalist*, 52(3): 262-268.
- De la Torre-Robles, L., Buenrostro-Silva, A. y García-Grajales, J. (2017). Temperaturas de incubación y proporción sexual en nidos de tortugas marinas de la Playa San Juan Chacahua, Oaxaca, México. *Agroproductividad*, 10(5): 39-45.
- DOF, Diario Oficial de la Federación (29 de octubre de 1986). Decreto por el que se determinan como zonas de reserva y sitios de refugio para la protección, conservación, repoblación, desarrollo y control, de las diversas especies de tortuga marina, los lugares en que anida y desova dicha especie. México. Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4815894&fecha=29/10/1986 [consulta: 20 marzo 2022].
- DOF, Diario Oficial de la Federación (16 de julio de 2002). Acuerdo por el que se determinan como áreas naturales protegidas, con la categoría de santuarios, a las zonas de reserva y sitios de refugio para la protección, conservación, repoblación, desarrollo y control de las diversas especies de tortuga marina, ubicadas en los estados de Chiapas, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Oaxaca, Sinaloa, Tamaulipas y Yucatán, identificadas en el decreto en el decreto publicado el 29 de octubre de 1986. México. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=723470&fecha=16/07/2002 [consulta: 20 marzo 2022].
- Du, J., Xiang, X., Zhao, B. y Zhou, H. (2020). Impact of urban expansion on land surface temperature in Fuzhou, China using Landsat imagery. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102346. doi:10.1016/j.scs.2020.102346.
- Ezaz, T., Stiglec, R., Veyrunes, F. y Marshall Graves, J. A. (2006). Relationships between vertebrate ZW and XY sex chromosome systems. *Current Biology*, 16(17): R736-43. doi:10.1016/j.cub.2006.08.021.
- Ferguson, M. W. y Joanen, T. (1982). Temperature of egg incubation determines sex in *Alligator mississippiensis*. *Nature*, 296(5860): 850-853. doi:10.1038/296850a0.
- Foga, S., Scaramuzza, P. L., Guo, S., Zhu, Z., Dilley, R. D., Beckmann, T., Schmidt, G. L., Dwyer, J. L., Hughes, M. J. y Laue, B. (2017). Cloud detection algorithm comparison and validation for operational Landsat data products. *Remote Sensing of Environment*, 194, 379-390. doi:10.1016/j.rse.2017.03.026.
- Fuentes, M. M., Maynard, J. A., Guinea, M., Bell, I. P., Werdell, P. J. y Hamann, M. (2009). Proxy indicators of sand temperature help project impacts of global warming on sea turtles in northern Australia. *Endangered Species Research*, 9: 33-40. doi:10.3354/esr00224.
- Gaona, O. y Barragán, A. (2016). Las tortugas marinas en México: logros y perspectivas para su conservación. Soluciones Ambientales Itzeni A. C. y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México.
- Garduño-Andrade, E. y Cervantes, E. (1996). Influencia de la temperatura y la humedad en la sobrevivencia en nidos *in situ* y en corral de tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*) en Las Coloradas, Yuc., México. *INP. SEMAPNAP. Ciencia Pesquera*, 12: 90-98.
- Georges, A., Limpus, C. J. y Stoutjesdijk, R. (1994). Hatchling sex in the marine turtle *Caretta caretta* is determined by proportion of development at a temperature, not daily duration of exposure. *Journal of Experimental Zoology*, 270(5): 432-444. doi:10.1002/jez.1402700504.
- Gillespie, A. R., (1985). Lithologic mapping of silicate rocks using TIMS, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, 29-44.

- Gillespie, A. R., Rokugawa, S., Hook, S. J., Matsunaga, T. y Kahle, B. (1999). Temperature/emissivity separation algorithm theoretical basis document, version 2.4. Algorithm theoretical basis document. NASA Contract number NAS5-31372.
- GISTEMP/NASA (2022). GISS Surface temperature analysis (GISTEMP). NASA Goddard Institute for Space Studies. Disponible en: data.giss.nasa.gov/gistemp/ [consulta: 11 de febrero 2022].
- Godfrey, M.H., D'Amato, A. F., Marcovaldi, M. A. y Mrosovsky, N. (1999). Pivotal temperature and predicted sex ratios for hatchling hawksbill turtles from Brazil. *Canadian Journal of Zoology*, 77: 1465–1473.
- Hansen, J. y Lebedeff, S. (1987). Global trends of measured surface air temperature. *Journal of Geophysical Research*, 92(D11): 13345. doi:10.1029/jd092id11p13345.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lo, K., Lea, D. W. y Medina-Elizade, M. (2006). Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(39): 14288-14293. doi:10.1073/pnas.0606291103.
- Hecht, E. (2002). Optics. 4ta ed. Addison-Wesley, San Francisco, California, USA.
- Hereher, M. E. (2016a). Time series trends of land surface temperatures in Egypt: a signal for global warming. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1218. doi:10.1007/s12665-016-6024-4.
- Hereher, M. E. (2016b). Recent trends of temperature and precipitation proxies in Saudi Arabia: implications for climate change. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(11): 575. doi:10.1007/s12517-016-2605-5.
- Hewavisenthi, S. y Parmenter, C. J. (2000). Hydric environment and sex determination in the flatback turtle (*Natator depressus*, Garman) (*Chelonia: Cheloniidae*). *Australian Journal of Zoology*, 48(6): 653-659. doi:10.1071/zo00049.
- Howard, R., Bell, I. y Pike, D. A. (2014). Thermal tolerances of sea turtle embryos: current understanding and future directions. *Endangered Species Research*, (26): 75-86. doi:10.3354/esr00636.
- Hulley, G. C., Ghent, D. y Merchant, C. J. (2019). 1. Introduction to the Remote Sensing of Earth-Surface Temperatures. En: Taking the temperature of the Earth. Elsevier pp. 1-4. doi:10.1016/b978-0-12-814458-9.00001-0.
- INEGI (2017). Guía para la interpretación de cartografía. Uso del suelo y vegetación. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Aguascalientes.
- INEGI (2021). Uso de suelo y vegetación a escala 1:250,000, Serie VII. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). México.
- IUCN (2021). The IUCN red list of threatened species. Versión 2020-3. Disponible en: <https://www.iucnredlist.org> [consulta: 02 de marzo 2021].
- Jiménez-Muñoz, J. C. y Sobrino, J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 108(D22): 4688. doi:10.1029/2003JD003480. 108.
- Kappelle, M., Van Vuuren, M. M. I. y Baas, P. (1999). Effects of climate change on biodiversity: a review and identification of key research issues. *Biodiversity and Conservation*, 8(10): 1383-1397. doi: 10.1023/a:1008934324223.
- Kat, C. y Schalk, P. (2012). Validation metric based on relative error, *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 18(5): 487-520. doi:10.1080/13873954.2012.663392.
- Laffly, D. (2020). A brief history of remote sensing. *TORUS 2- Toward an Open Resource Using Services*, 1-21. doi:10.1002/9781119720553.ch1.
- Laloë, J.-O., Esteban, N., Berkel, J. y Hays, G. C. (2016). Sand temperatures for nesting sea turtles in the Caribbean: Implications for hatchling sex ratios in the face of climate

- change. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 474: 92-99. doi:10.1016/j.jembe.2015.09.015.
- Lang, J. W., Andrews, H. y Whitaker, R. (1989). Sex determination and sex ratios in *Crocodylus palustris*. *American Zoologist*, 29(3): 935-952.
- Li, Z. L., Wu, H., Duan, S. B., Zhao, W., Ren, H., Liu, X., Leng P., Tang, R., Ye, X., Zhu, J., Sun, Y., Si, M., Liu, M., Li, J., Zhang, X., Shang, G., Tang, Bo-Hui, Yang, G. y Zhou, C. (2023). Satellite remote sensing of global land surface temperature: Definition, methods, products, and applications. *Reviews of Geophysics*, 61(1), e2022RG000777.
- Maneja, R. H. *et al.* (2021). Multidecadal analysis of beach loss at the major offshore sea turtle nesting islands in the northern Arabian Gulf. *Ecological Indicators*, 121(2021), 107146. doi:10.1016/j.ecolind.2020.107146.
- Marcovaldi, M. A., Godfrey, M. H. y Mrosovsky, N. (1997). Estimating sex ratios of loggerhead turtles in Brazil from pivotal incubation durations. *Canadian Journal of Zoology*, 75(5): 755-770. doi:10.1139/z97-097.
- Martínez-Barbáchano, R. (2020). Estimación de la temperatura superficial en imágenes históricas Landsat 5 mediante corrección atmosférica monocanal en el térmico para la cuenca del río Tempisque-Bebedero (Costa Rica). *Revista Geográfica de América Central*, 2(65): 17-32. doi:10.15359/rgac.65-2.1.
- Matiz-León, J. C., Rodríguez-Rodríguez, G. F. y Alfaro-Valero, C. M. (2019). Modelos de temperatura del suelo a partir de sondeos superficiales de temperatura y sensores remotos para el área geotérmica del volcán Azufral. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 29(1): 19-36. doi:org/10.18359/rcin.3400.
- McMillin, L. M. (1975). Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption. *Journal of Geophysical Research*, 80(36): 5113-5117. doi:10.1029/jc080i036p05113.
- McCoy, C. J., Vogt, R. C. y Censky, E. J. (1983). Temperature-controlled sex determination in the sea turtle *Lepidochelys olivacea*. *Journal of Herpetology*, 17(4): 404-406. doi:10.2307/1563594.
- Miller, J. D. y Limpus, C. J. (1981). Incubation period and sexual differentiation in the green turtle, *Chelonia mydas* L. En: Banks, C. B. y Martin, A. A. (Ed.) Proceedings of the Melbourne Herpetological Symposium, Melbourne. *The Zoological Board of Victoria*, 66-73 p.
- Monsinjon, J. R., Wyneken, J., Rusenko, K., López-Mendilaharsu, M., Lara, P., Santos, A., Marcovaldi, M., Fuentes, M. A. G., Kaska, Y., Tucek, J., Nel, R., Williams, K. L., LeBlanc, A., Rostal, D., Guillon, J. y Girondot, M. (2019). The climatic debt of loggerhead sea turtle populations in a warming world. *Ecological Indicators*, 107. doi:10.1016/j.ecolind.2019.105657.
- Morreale, S. J., Ruiz, G. J., Spotila J. R. y Standora, E. A. (1982). Temperature dependent sex determination: current practices threaten conservation of sea turtles. *Science*, 216(4551): 1245-1247. doi:10.1126/science.7079758.
- Mortimer, J. A. (1990). The influence of beach sand characteristics on the nesting behavior and clutch survival of green turtles (*Chelonia mydas*). *Copeia*, 3, 802-817. doi:10.2307/1446446.
- Mrosovsky, N., Dutton, P.H. y Whitmore, C. P. (1984). Sex ratios of two species of sea turtles nesting in Suriname. *Canadian Journal of Zoology*, 62: 2227-2239. doi:10.1139/z84-324.
- Mrosovsky, N. (1988). Pivotal temperatures for loggerhead turtles (*Caretta caretta*) from northern and southern nesting beaches. *Canadian Journal of Zoology*, 66: 661-669.

- Mrosovsky, N., Bass, A., Corliss, L. A., Richardson, J. I. y Richardson, T. H. (1992). Pivotal and beach temperatures for hawksbill turtles nesting in Antigua. *Canadian Journal of Zoology*, 70: 1920–1925.
- Mukherjee, F. y Singh, D. (2020). Assessing land use–land cover change and its impact on land surface temperature using LANDSAT data: A comparison of two urban areas in India. *Earth Systems and Environment*, 2020(4): 385–407. doi:10.1007/s41748-020-00155-9.
- Mulders, M. A. (1987). Remote sensing in soil science. Elsevier, Ámsterdam.
- Murray, J. D., Deeming, D. C. y Ferguson, M. W. (1990). Size-dependent pigmentation-pattern formation in embryos of *Alligator mississippiensis*: Time of initiation of pattern generation mechanism. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 239(1296): 279–293. doi:10.1098/rspb.1990.0017.
- Natih, N., Pasaribu, R., Al Hakim, M., Budi, P. y Tasirilelu, G. (2021). Olive ridley (*Lepidochelys olivacea*) laying eggs habitat mapping in Penimbangan Beach, Bali Island. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 944(1): 012038. doi:10.1088/1755-1315/944/1/012038.
- Ormeño, S. (2006). Teledetección fundamental. 3ra ed. Universidad politécnica, Madrid, España.
- Packard, G. C., Packard, M. J. y Gutzke, W. H. (1985). Influence of hydration of the environment on eggs and embryos of the terrestrial turtle *Terrapene ornata*. *Physiological Zoology*, 58(5): 564-575.
- Parra, J. C., Sobrino, J. A., Acevedo, P. S. y Morales, L. J. (2006). Estimación de la temperatura de suelo desde datos satelitales AVHRR-NOAA aplicando algoritmos de split window. *Revista Mexicana de Física*, 52(3): 238-245.
- Pieau, C. (1975). Temperature and sex differentiation in embryos of two chelonians, *Emys orbicularis* L. and *Testudo graeca* L. En: Reinboth, R. (eds). Intersexuality in the Animal Kingdom. Springer, Berlin, Heidelberg, 332-339. doi:10.1007/978-3-642-66069-6_31.
- Pieau, C. (1996). Temperature variation and sex determination in reptiles. *BioEssays*, 18(1): 19-26. doi:10.1002/bies.950180107.
- Prata, A. J. (1994). Land surface temperatures derived from the advanced very high-resolution radiometer and the along-track scanning radiometer: 2. Experimental results and validation of AVHRR algorithms. *Journal of Geophysical Research*, 99(D6): 13025. doi:10.1029/94jd00409.
- Price, J. C. (1984). Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 advanced very high-resolution radiometer. *Journal of Geophysical Research*, 89(D5): 7231. doi:10.1029/jd089id05p07231.
- Qin, Z., Karnieli, A. y Berliner, P. (2001). A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region, *International Journal of Remote Sensing*, (22)18: 3719-3746. doi:10.1080/01431160010006971.
- Qin, Z., Karnieli, A. y Berliner, P. (2002). Remote sensing analysis of the land surface temperature anomaly in the sand-dune region across the Israel-Egypt border. *International Journal of Remote Sensing*, 23(19): 3991-4018. doi:10.1080/01431160110116310.
- Rahman, M. T., Aldosary, A. S. y Mortoja, M. G. (2017). Modeling future land cover changes and their effects on the land surface temperatures in the Saudi Arabian Eastern coastal city of Dammam. *Land*, 6(2):36. doi:10.3390/land6020036.
- Rimblot, F., Pieau, C., Lescure, J., Mrosovsky, N. y Fretey, J. (1985). Sexual differentiation as a function of the incubation temperature of eggs in the sea-turtle *Dermochelys coriacea* (Vandelli, 1761). *Amphibia-Reptilia*, 6(1): 83-92. doi:10.1163/156853885x00218.

- Robock, A. (2000). Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics*, 38(2): 191-219. doi:10.1029/1998rg000054.
- Rodríguez-Pulido, J. A., Mira-López, T. M. y Cruz-Casallas, P. E. (2018). Determinación, diferenciación sexual y pubertad en peces. *Orinoquia*, 22(1): 80-91. doi:10.22579/20112629.487.
- Román-Palacios, C. y Wiens, J. (2020). Recent responses to climate change reveal the drivers of species extinction and survival. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(8): 4211-4217. doi:10.1073/pnas.1913007117.
- Roth, M., Oke, T. R. y Emery, W. J. (1989). Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *International Journal of Remote Sensing*, 10(11): 1699-1720. doi:10.1080/01431168908904002.
- Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- Sandoval, S. (2008). Pronóstico de la temperatura de los nidos de tortuga golfina (*Lepidochelys olivacea*) en función de la temperatura ambiente, la profundidad y el calor metabólico. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional, La Paz, B. C. S., México.
- Sandoval, S. (2012). Proporción sexual en crías de tortuga *Lepidochelys olivacea* en corrales de incubación del Pacífico Mexicano. Tesis doctoral. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional, La Paz, B. C. S., México.
- Schlacher, T. A., Dugan, J., Schoeman, D., Lastra, M., Jones, A., Scapini, F., McLachlan, A. y Defeo, O. (2007). Sandy beaches at the brink. *Diversity and Distributions*, 13: 556-560. doi: 10.1111/j.1472-4642.2007.00363.x.
- Shaver, D. J. et al. (1988). Styrofoam box and beach temperatures in relation to incubation and sex ratios of Kemp's ridley sea turtles. En: Schroeder, Barbara A. Proceedings of the Eighth Annual Workshop on Sea Turtle Conservation and Biology, Corpus Christi, Texas, 103-108.
- Short, N. M. (1982). The Landsat tutorial workbook: Basics of satellite remote sensing. 1ra ed. NASA, Scientific and Technical Information Branch, Washington, D. C.
- Solanki, S. K., Krivova, N. A. y Haigh, J. D. (2013). Solar irradiance variability and climate. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 51(1): 311-351. doi:10.1146/annurev-astro-082812-14100.
- Sobrino, J. A., Sobrino, J., Raissouni, N., Kerr, Olivoso, López, M. J., Belaid, El-Kharraz, J., Cuenca, J. y Dempere (2000). Teledetección. 1ra ed. Universidad de Valencia, España. doi:10.13140/2.1.2883.3283.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C. y Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4): 434-440. doi:10.1016/j.rse.2004.02.003.
- Sosa-Cornejo, I., Moran-Angulo, R. E., Enciso-Saracho, F., Barraza-Ortega, M. A., Contreras-Aguilar, H. y Sosa-Pérez, R. (2019). Características físicas y químicas del sustrato arenoso de la zona de anidación de la tortuga marina *Lepidochelys olivacea* en Playa Ceuta, Sinaloa, México. En: Cuevas Flores, E. A, Guzmán Hernández, V., Guerra Santos, J. J. y Rivas Hernández, G. A. (Eds.). El uso del conocimiento de las tortugas marinas como herramienta para la restauración de sus poblaciones y hábitats asociados. Universidad Autónoma del Carmen, México. 151-160.
- Spotila, J. R., Standora, E. A., Morreale, S. J. y Ruiz, G. J. (1987). Temperature dependent sex determination in the green turtle (*Chelonia mydas*): effects on the sex ratio on a natural nesting beach. *Herpetologica*, 43: 74-81.

- Spotila, J. R., Zimmerman, L. C., Binckley, C. A., Grumbles, J. S., Rostal, D. C., List, A., Beyer, E. C., Phillips, K. M. y Kemp, S. J. (1994). Effects of incubation conditions on sex determination, hatching success and growth of hatchling desert tortoises, *Gopherus agassizii*. *Herpetological Monographs*, 8: 103-116. doi:10.2307/1467074.
- Stubenrauch, C. J., et al. (2013). Assessment of global cloud datasets from satellites: Project and database initiated by the GEWEX radiation panel. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(7): 1031-1049. doi:10.1175/BAMS-D-12-00117.1.
- Tanabe, L., Ellis, J., Elsadek, I. y Berumen, M. (2020). Potential feminization of Red Sea turtle hatchlings as indicated by *in situ* sand temperature profiles. *Conservation Science and Practice*, 2: 1-12. doi:10.1111/csp2.266.
- Tett, S. F. B., Stott, P. A., Allen, M. R., Ingram, W. J. y Mitchell, J. F. B. (1999). Causes of twentieth-century temperature change near the Earth's surface. *Nature*, 399(6736): 569-572. doi:10.1038/21164.
- Thomas, C. D. y Lennon, J. J. (1999). Birds extend their ranges northwards. *Nature*, 399: 213. doi:10.1038/20335.
- Tippens, P. (2001). Física, conceptos y aplicaciones. 6ta ed. Mc Graw Hill interamericana, México.
- Torres-Maldonado, L. C. y Merchant-Larios, H. (2006). Aspectos moleculares de la determinación del sexo en tortugas. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 13(2): 176-182.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of the Environment*, 8, 127-150. doi:10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- USGS (2019). Landsat 8 (L8) data users handbook. Versión 5.0. Disponible en: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-data-users-handbook> [consulta: 24 junio 2022].
- USGS (2022). What are the best Landsat spectral bands for use in my research? Disponible en: <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-best-landsat-spectral-bands-use-my-research> [consulta: 24 junio 2022].
- Valadez-González, C., Silva, F. y Hernández, S. (2000). Proporción sexual en crías de la tortuga marina *Lepidochelys olivacea*, producida en corral de incubación en la playa de anidación La Gloria, Jalisco, México. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas, Universidad del Zulla, Maracaibo, Venezuela*. 34(3): 305-313.
- Valderrama-Landeros, et al. (2020). Spatiotemporal shoreline dynamics of Marismas Nacionales, Pacific coast of Mexico, based on a remote sensing and GIS mapping approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192:123. doi:10.1007/s10661-020-8094-8.
- Valor, E. y Caselles, V. (1996). Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. *Remote Sensing of Environment*, 57(3): 167-184. doi:10.1016/0034-4257(96)00039-9.
- Vancutsem, C., Ceccato, P., Dinku, T. y Connor, S. J. (2010). Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa. *Remote Sensing of Environment*, 114(2): 449-465. doi:10.1016/j.rse.2009.10.002.
- Vogt, R. C., Bull, J. J., McCoY, C. J. y Houseal, T. W. (1982). Incubation temperature influences sex determination in kinosternid turtles. *Copeia*, 1982(2): 480-482. doi: 10.2307/1444639.
- Walker, H. J. (2006). Evelyn Lord Pruitt, 1918–2000. *Annals of the Association of American Geographers*, 96(2): 432-439. doi:10.1111/j.1467-8306.2006.00487.x.

- Wang, L., Lu, Y. y Yao, Y. (2019). Comparison of three algorithms for the retrieval of land surface temperature from Landsat 8 images. *Sensors*; 19(22): 5049. doi:10.3390/s19225049.
- Wark, D. Q., Yamamoto, G. y Lienesch, J. H. (1962). Methods of estimating infrared flux and surface temperature from meteorological satellites. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 19(5): 369-384. doi:10.1175/1520-0469(1962)019<0369:moeifa>2.0.co;2.
- Weimer, R. (2003). Estadística. 2da ed. Compañía editorial continental. México, D. F.
- Weng, Q., Fu, P. y Gao, F. (2014). Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data. *Remote sensing of environment*, 145: 55-67.
- Wibbels, T., Rostal, D. C. y Byles, R. (1998). High pivotal temperature in the sex determination of the olive ridley sea turtle, *Lepidochelys olivacea*, from Playa Nancite, Costa Rica. *Copeia*, 1998(4): 1086-1088. doi:10.2307/1447364.
- Wibbels, T. (2003). Critical approaches to sex determination in sea turtles. En: Lutz, P. L., Musick, J. A. y Wyneken, J. (Ed.). *The Biology of Sea Turtles*, Vol. II, CRC Press, Boca Ratón, Florida, pp. 103-134.
- Williams, G. (2011). Caracterización ambiental del golfo San Matías mediante sensores remotos y parámetros oceanográficos. Relación con la distribución y abundancia de los recursos biológicos de interés pesquero. Tesis doctoral. Centro Regional Universitario Bariloche, Universidad Nacional del Comahue, Argentina.
- Wulder, M. A. (1998). Optical remote sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical parameters. *Progress in Physical Geography*, 22(4): 449-476. doi:10.1177/030913339802200402.
- Wulder, M. A., et al. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225: 127-147. doi:10.1016/j.rse.2019.02.015.
- Yntema, C. L. (1976). Effects of incubation temperatures on sexual differentiation in the turtle, *Chelydra serpentina*. *Journal of Morphology*, 150(2): 453-461. doi: 10.1002/jmor.1051500212.
- Yntema, C. L. y Mrosovsky, N. (1980). Sexual differentiation in hatchling loggerhead (*Caretta caretta*) incubated at different controlled temperatures. *Herpetologica*, 36(1), 33-36.
- Young, H. D. y Freedman, R. A. (2009). Física universitaria, Volumen 1, 12va ed. Pearson Educación, México.
- Zar, J. (1999). Biostatistical Analysis. 5ta ed. Pearson Prentice Hall, Nueva Jersey, USA.
- Zhang, Y., Chen, Y., Li, J. y Chen, X. (2020). A simple method for converting 1-km resolution daily clear-sky LST into real LST. *Remote Sensing*, 12, 1641. doi:10.3390/rs12101641.
- Zhu, Z. y Woodcock, C. E. (2012). Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118, 83-94. doi:10.1016/j.rse.2011.10.028.

11. ANEXOS

ANEXO A

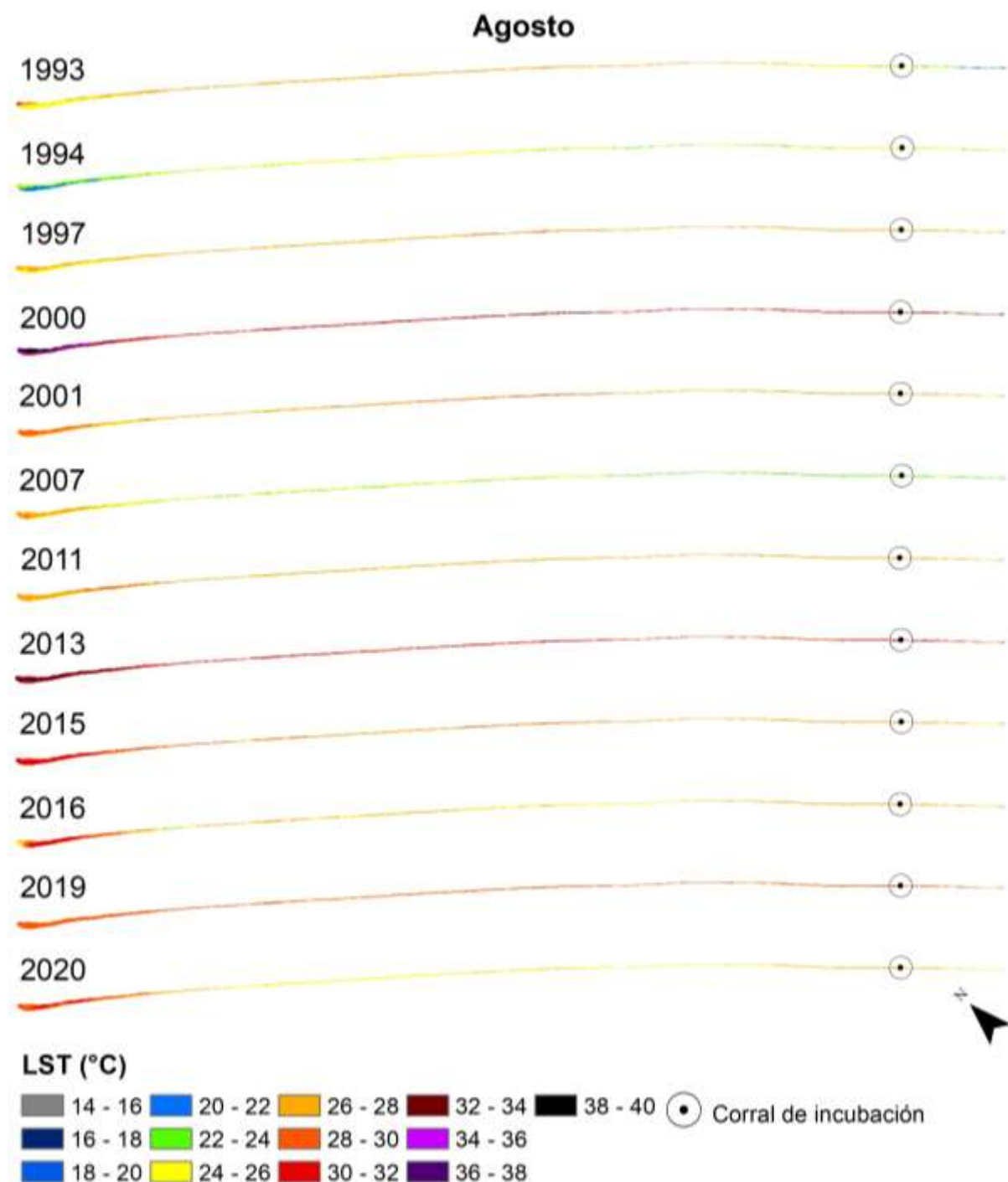
Imágenes de satélite utilizadas, fecha de adquisición y porcentaje de cobertura de nubes.

Satélite	Año	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre						
Landsat 5 TM	1987	07/26											
		45%											
	1988					09/26							
						97%							
	1992			09/09									
				9%									
	1993	07/10	07/26	08/11	08/27		09/28	10/14	10/30		11/15	12/01	12/17
		29%	10%	10%	84%		1%	21%	0%		14%	33%	0%
	1994	07/13	07/29	08/14	08/30			10/17	10/01	11/02		12/04	12/20
		6%	13%	34%	12%			7%	18%	41%		23%	79%
	1995		07/16	08/01	08/17	09/02	09/18	10/04	10/20		11/21	12/07	12/23
			41%	70%	51%	92%	47%	64%	4%		0%	45%	27%
	1996	07/02	07/18	08/03	08/19	09/04	09/20		10/22	11/07	11/23	12/09	12/25
		26%	54%	55%	16%	19%	18%		0%	0%	6%	13%	22%
	1997	07/05	07/21	08/06	08/22	09/07	09/23	10/09	10/25		11/26	12/12	12/28
		87%	4%	76%	9%	40%	94%	0%	58%		0%	9%	71%
	1998	07/08	07/24	08/09	08/25	09/10	09/26		10/28	11/13	11/29	12/15	12/31
		12%	32%	77%	82%	22%	81%		1%	80%	54%	7%	0%
	1999	07/11	07/27	08/12	08/28	09/13	09/29	10/15	10/31		11/16	12/02	12/18
		26%	16%	42%	41%	23%	1%	18%	0%		0%	43%	0%
	2000	07/13		08/14	08/30		09/15	10/01	10/17	11/02	11/18	12/04	12/20
		49%		72%	0%		64%	20%	1%	63%	66%	0%	0%
	2001		07/16	08/01	08/17	09/02	09/18	10/04	10/20	11/05	11/21	12/07	12/23
		35%	2%	89%	21%	10%	41%	1%	8%	2%	95%	21%	
2002	07/03	07/19	08/04	08/20	09/05	09/21	10/07	10/23	11/08	11/24		12/26	
	0%	87%	20%	57%	14%	8%	23%	3%	1%	0%		1%	
2003	07/06	07/22	08/07	08/23	09/08	09/24	10/10	10/26		11/27	12/13	12/29	
	39%	3%	54%	37%	87%	5%	62%	52%		9%	4%	0%	
2004	07/08	07/24	08/09	08/25		09/26	10/12	10/28	11/13	11/29		12/31	
	64%	61%	46%	3%		13%	0%	1%	41%	56%		0%	
2005	07/11	07/27	08/12	08/28	09/13	09/29	10/15	10/31		11/16			
	19%	20%	94%	31%	29%	45%	24%	3%		0%			
2006	07/14	07/30	08/15	08/31		09/16	10/02	10/18	11/03	11/19	12/05	12/21	
	58%	37%	40%	72%		100%	3%	2%	21%	0%	5%	16%	
2007	07/01	07/17	08/02	08/18	09/03	09/19	10/05						
	29%	32%	4%	76%	98%	7%	62%						
2008	07/03	07/19	08/04	08/20	09/05	09/21	10/07	10/23	11/08	11/24	12/10	12/26	
	86%	72%	72%	42%	8/6%	4%	5%	0%	0%	22%	31%	59%	
2009	07/06	07/22	08/07	08/23	09/08	09/24	10/10	10/26	11/11	11/27	12/13		
	10%	31%	13%	87%	21%	12%	7%	6%	0%	6%	0%		
2010	07/09		08/10					10/29	11/14	11/30		12/16	
	66%		45%					0%	14%	0%		1%	
2011				08/29						11/01			
				20%						0%			
Landsat 8 OLI	2013	07/01	07/17	08/02	08/18	09/03	09/19	10/05	10/21	11/06	11/22	12/08	12/24
		42.1%	86.9%	23.2%	23.1%	84.4%	100%	1.2%	0.4%	0.9%	11.4%	0.9%	10.0%
	2014	07/04	07/20	08/05	08/21	09/06	09/22	10/08	10/24	11/09	11/25	12/11	12/27
		77%	71.1%	6.1%	20.1%	12.8%	28.1%	11.9%	1.0%	1.9%	0%	27.4%	69.9%
	2015	07/07	07/23	08/08	08/21	09/09	09/25	10/11	10/27	11/12	11/28	12/14	12/30
		23.0%	21.8%	7.1%	15.8%	16.2%	24.9%	100%	0.2%	84.4%	99.9%	0%	8.5%
	2016	07/09	07/25	08/10	08/26	09/11	09/27	10/13	10/29	11/14	11/30		12/16
		15.8%	3.1%	68.1%	0.1%	40.3%	13.3%	8.4%	3.7%	3.0%	1.0%		1.3%
	2017	07/12	07/28	08/13	08/29	09/14	09/30		10/16	11/01	11/17	12/03	12/19
		62.2%	60.0%	46.9%	6.1%	29.6%	20.8%		0.0%	2.8%	0.4%	36.6%	57.3%
	2018	07/15	07/31		08/16	09/01	09/17	10/03	10/19	11/04	11/20	12/06	12/22
		58.7%	19.3%		33.9%	65.6%	93.7%	6.7%	62.4%	0%	42.2%	47.0%	26.0%
	2019	07/02	07/18	08/03	08/19	09/04	09/20	10/06	10/22	11/07	11/23	12/09	12/25
		19.82%	15.9%	16.8%	33.3%	16.0%	100%	19.1%	1.0%	21.2%	0.3%	2.9%	15.0%
2020	07/04	07/20	08/05	08/21	09/06	09/22	10/08	10/24	11/09	11/25	12/11	12/27	
	38.8%	18.7%	15.6%	19.1%	95.9%	24.8%	2.7%	2.7%	9.5%	2.4%	69.8%	0%	
2021	07/07	07/23	08/08	08/24	09/09	09/25	10/11	10/27	11/12	11/28	12/14	12/30	
	91.5%	4.0%	14.5%	35.2%	92.4%	3.4%	14.3%	4.1%	3.1%	41.6%	28.4%	37.4%	

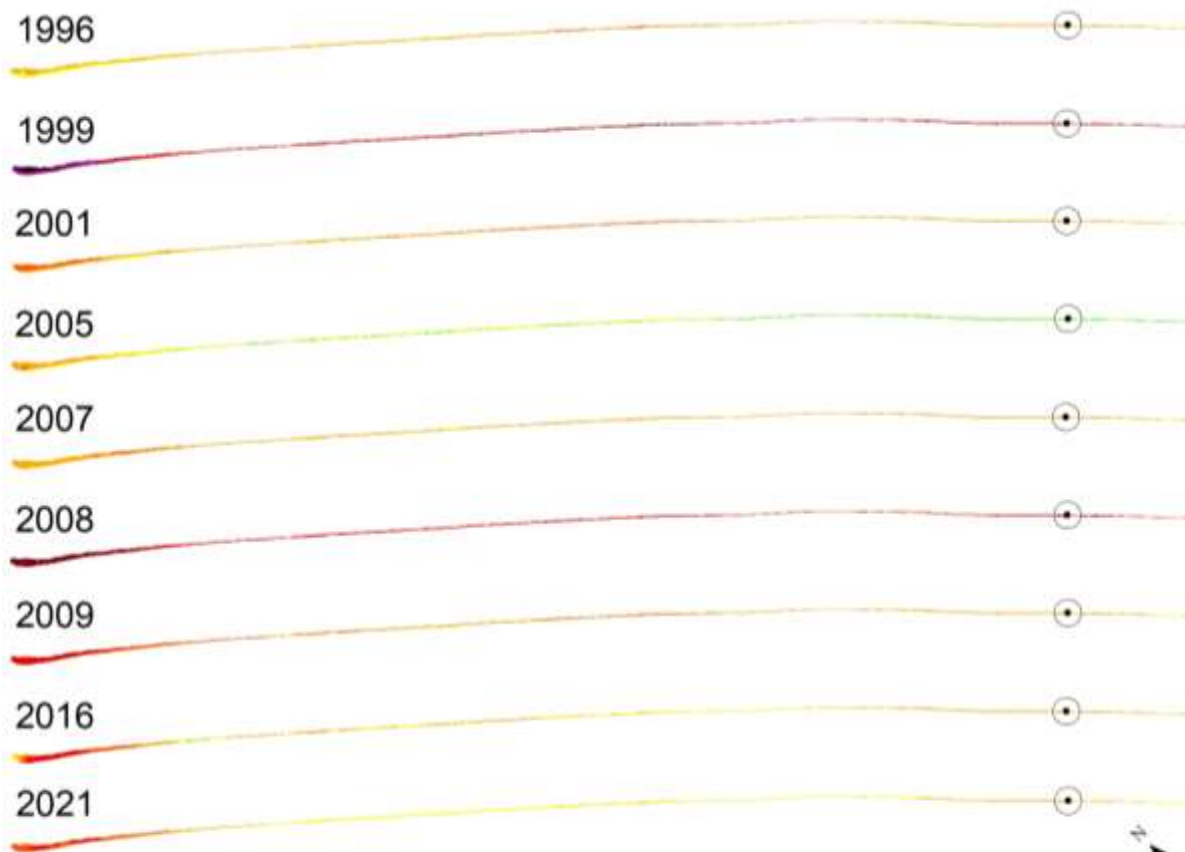
Nota: los cuadros sombreados en gris corresponden a las imágenes utilizadas.

ANEXO B

Mapas de distribución de la temperatura superficial de la arena (LST °C) del área de anidación del campamento tortuguero Playa Ceuta en los meses de la temporada de anidación, durante las últimas décadas.



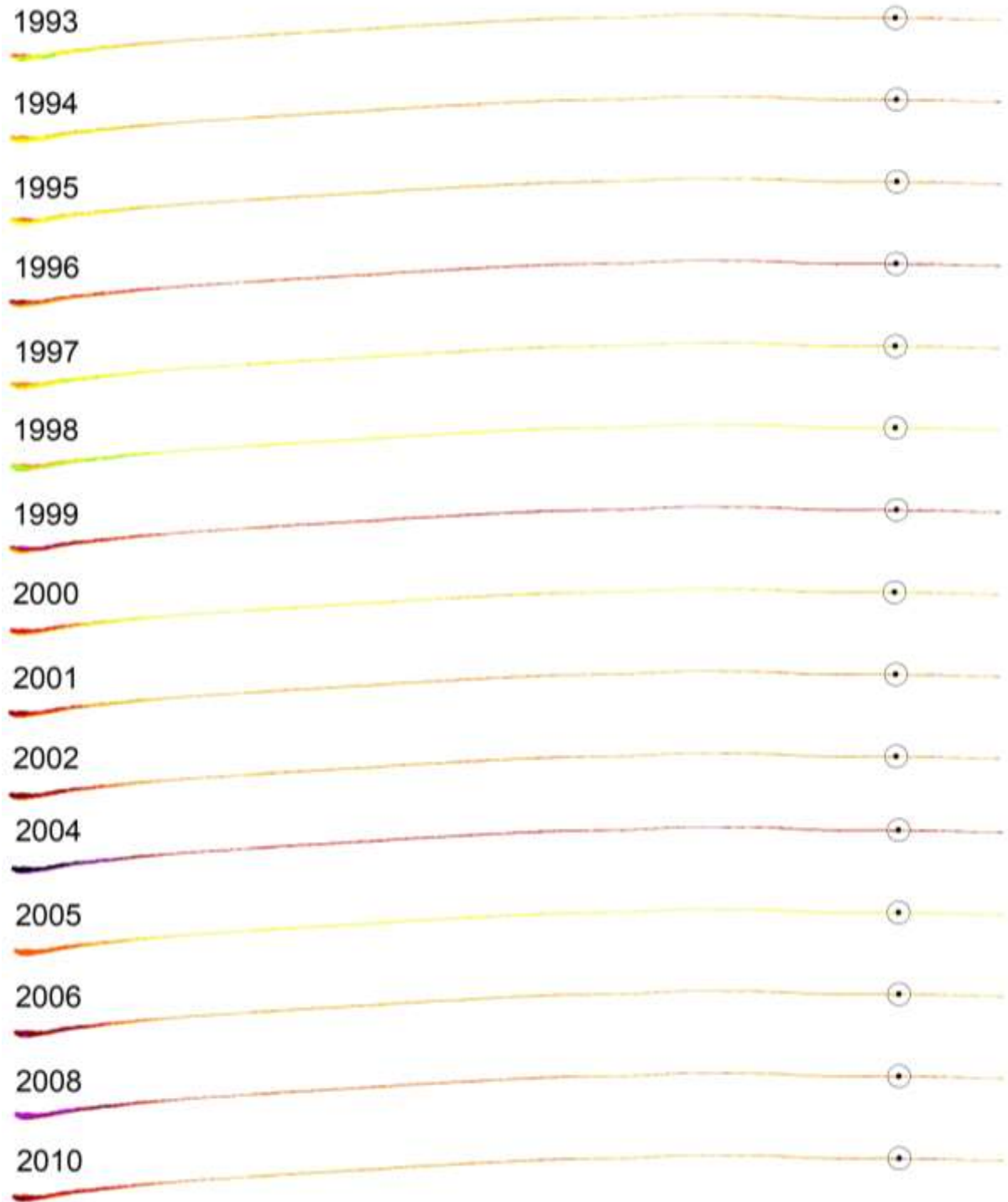
Septiembre



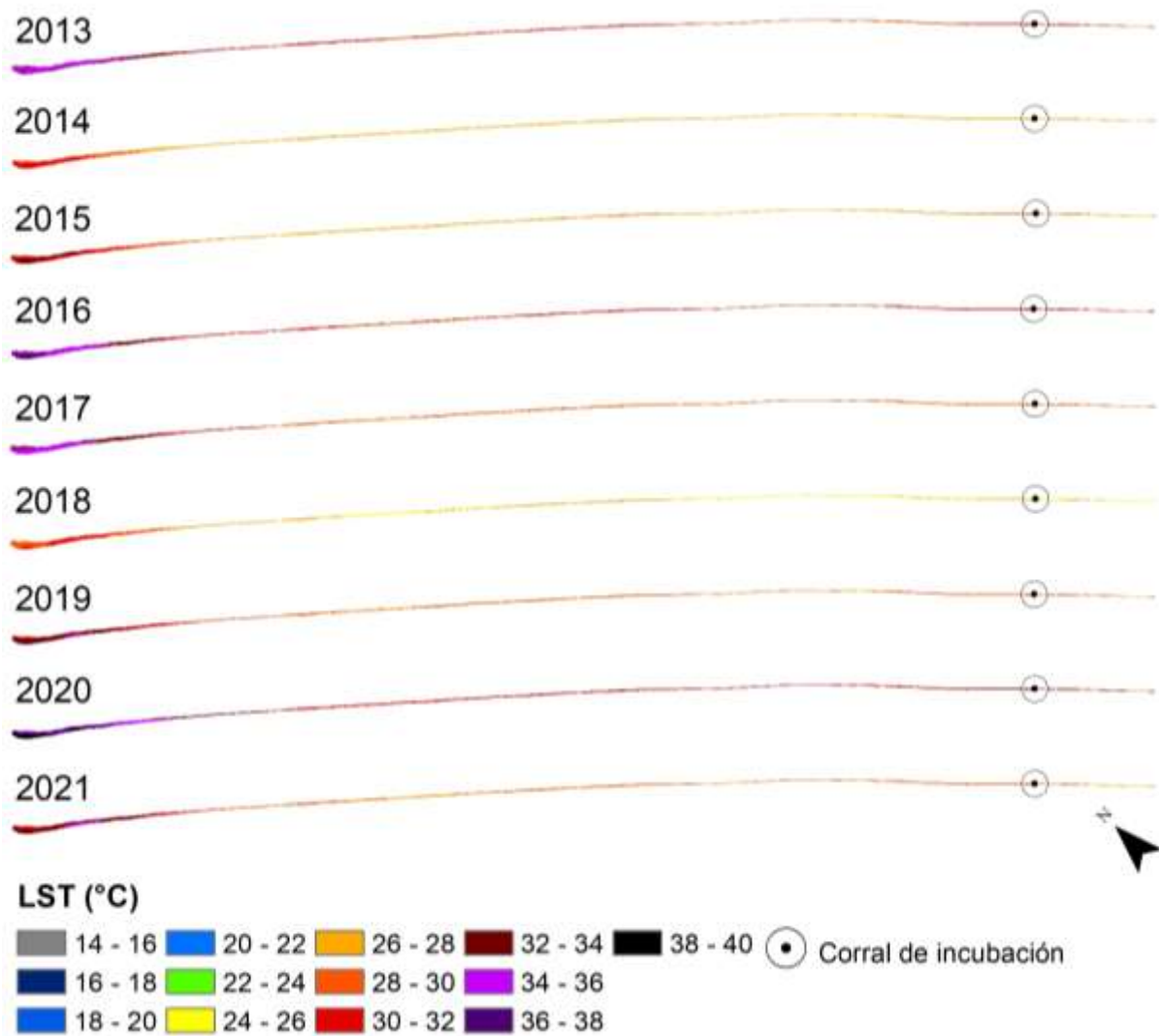
LST (°C)



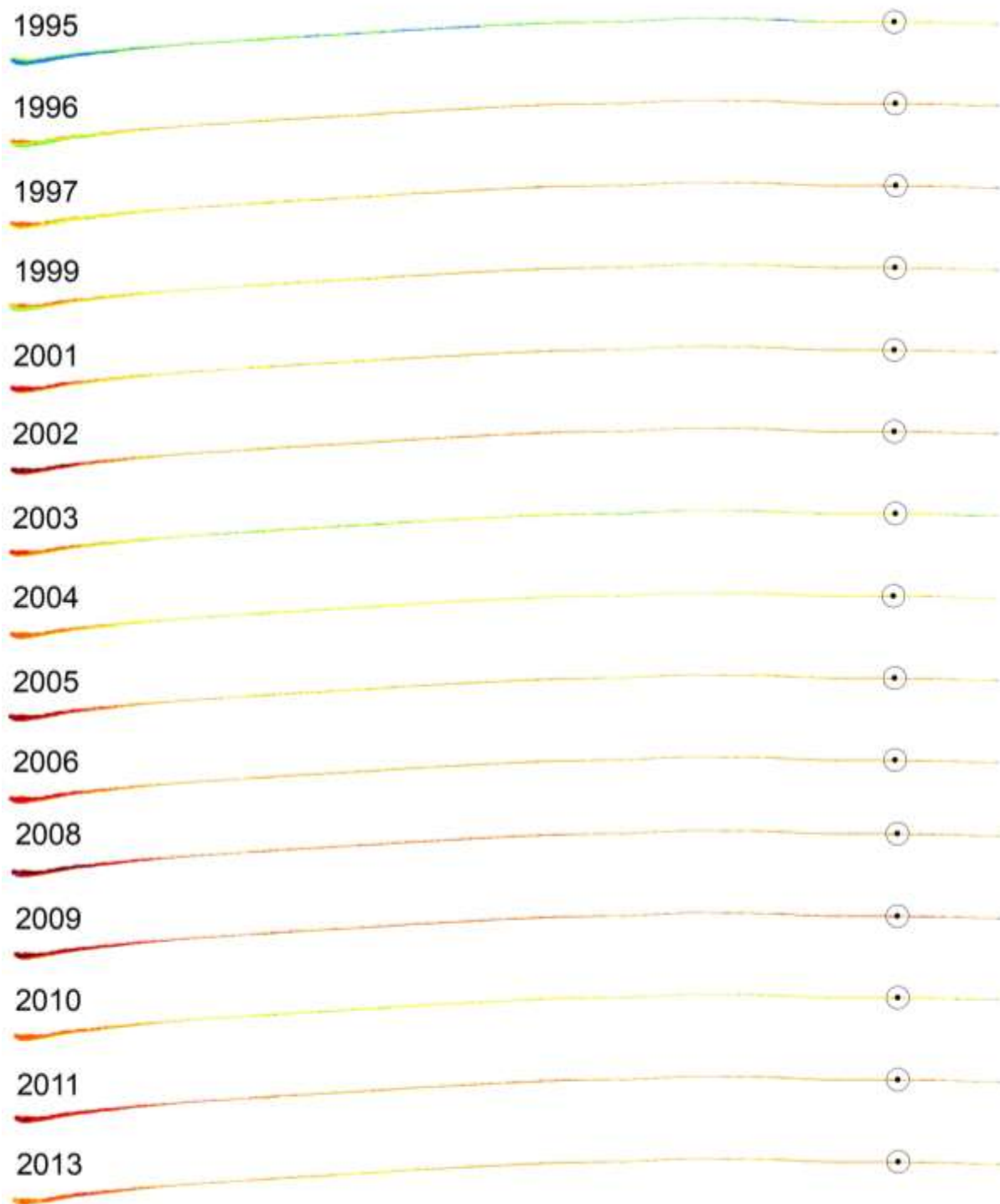
Octubre



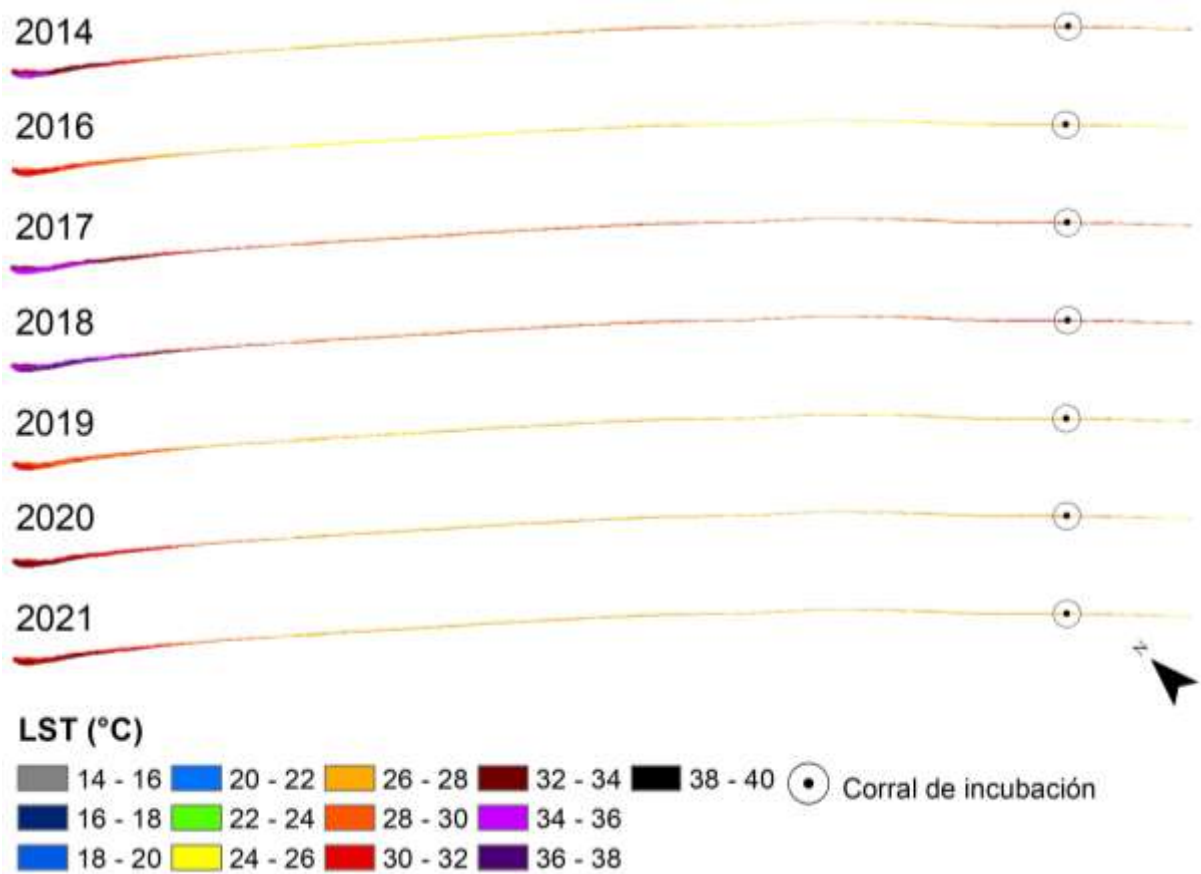
(continúa)



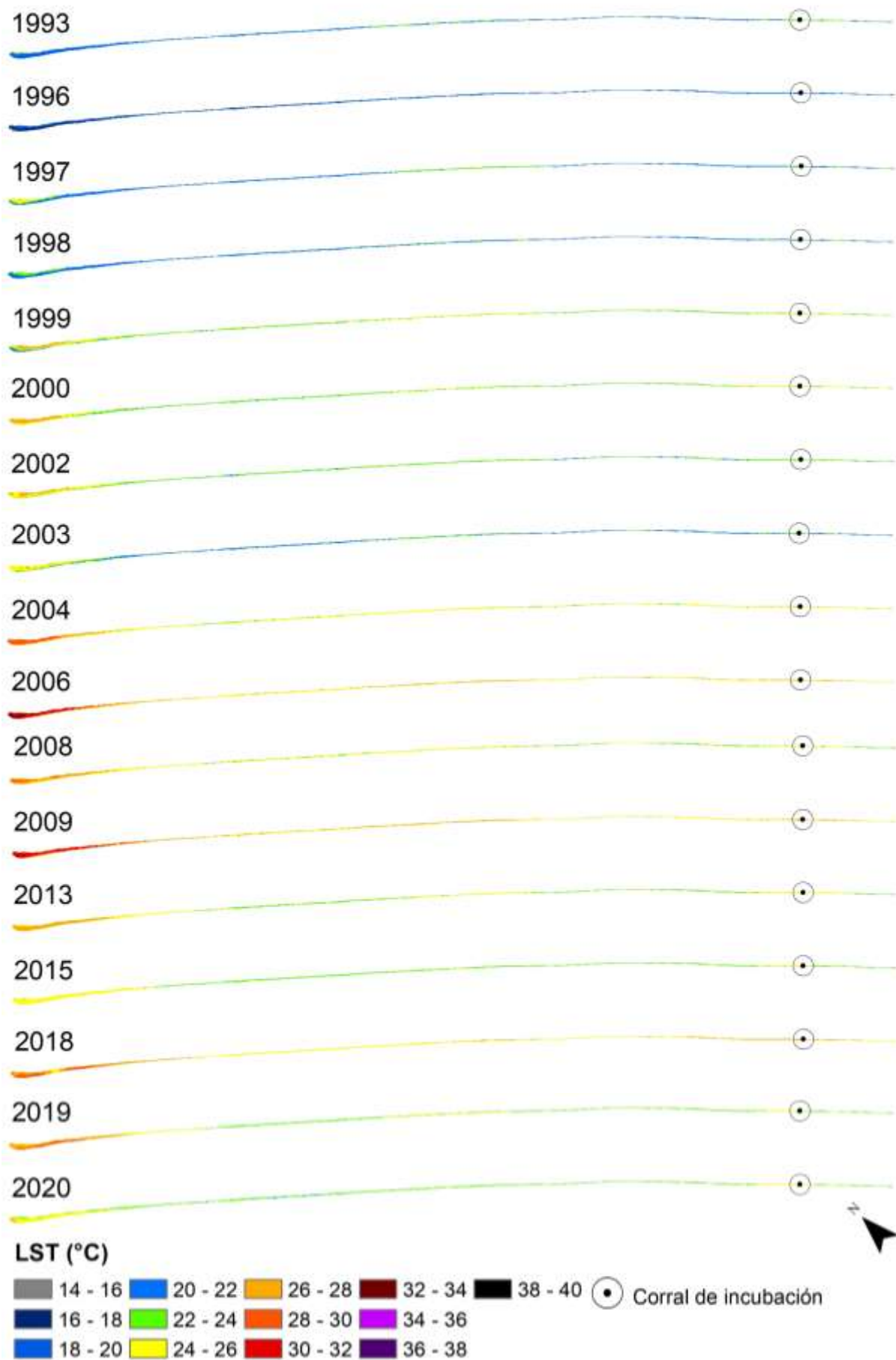
Noviembre



(continúa)



Diciembre



ANEXO C

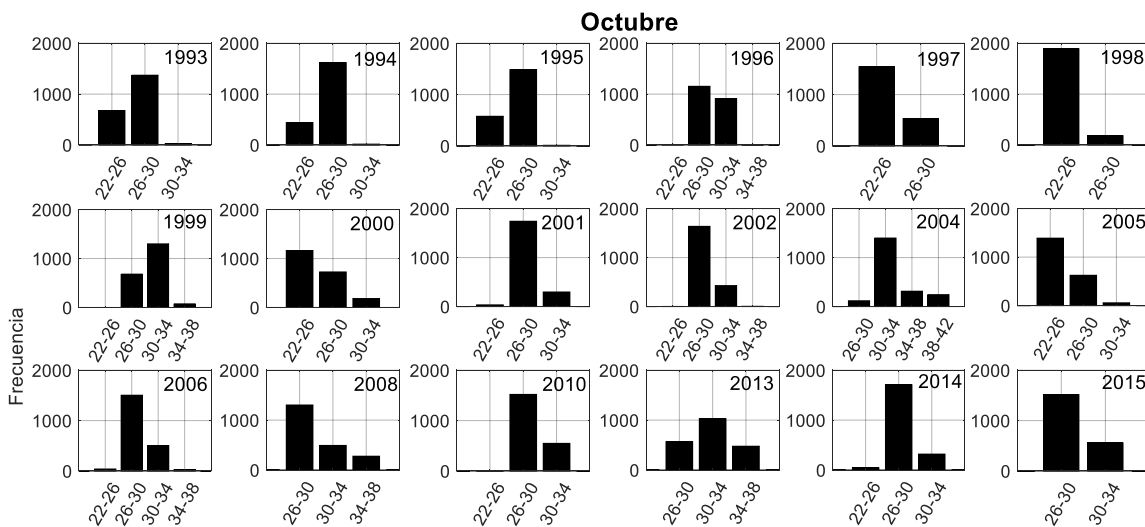
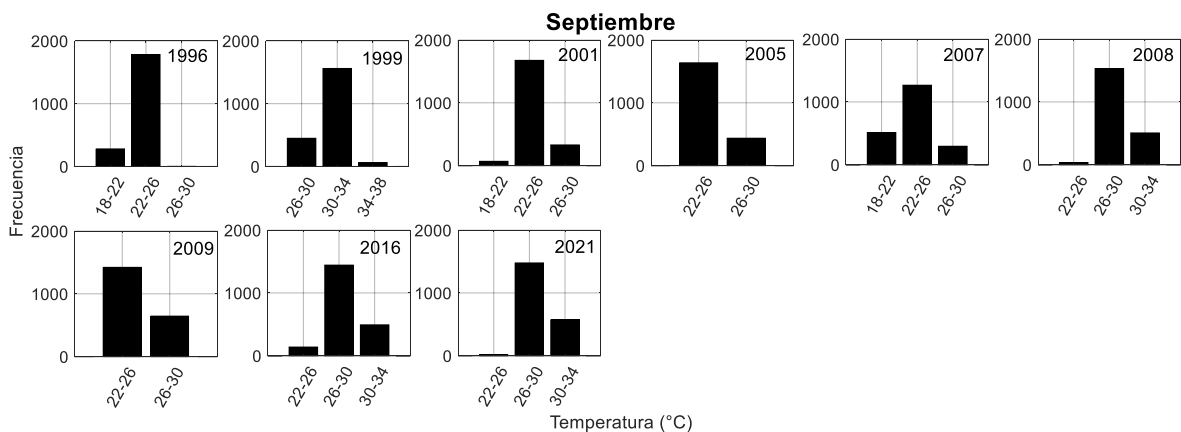
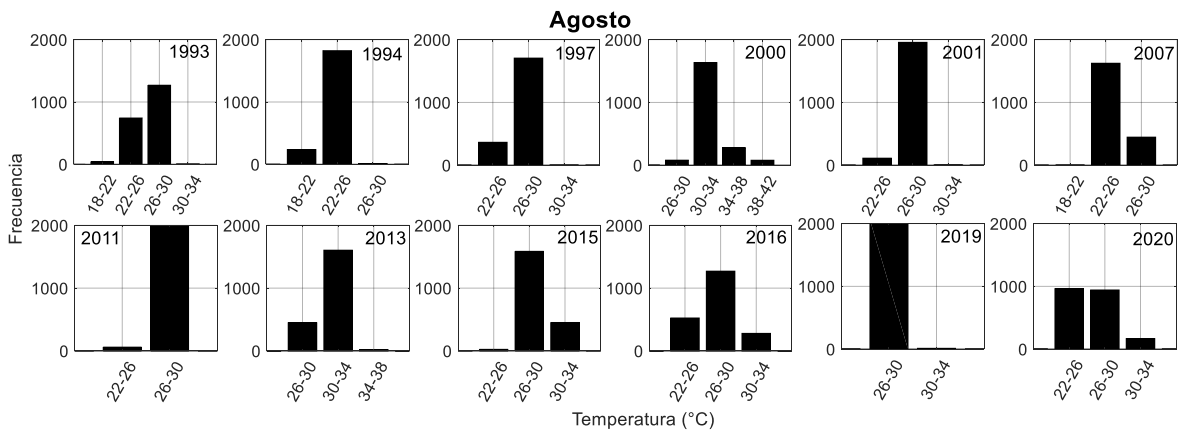
Valores mínimos, máximos y medias de temperatura superficial de la arena (LST °C) por mes.

Julio				Agosto				Septiembre			
Año	Min.	Máx.	Media	Año	Min.	Máx.	Media	Año	Min.	Máx.	Media
1994	21.0	27.0	24.1	1993	20.1	31.6	26.2	1996	21.0	26.2	23.2
1996	21.5	28.3	24.7	1994	21.0	27.0	23.8	1999	26.6	35.2	30.5
1997	23.6	30.0	26.7	1997	24.1	30.0	26.7	2001	19.2	29.1	25.0
1998	22.8	28.7	25.5	2000	28.3	39.1	32.1	2005	22.8	27.9	24.4
2002	26.2	33.2	29.5	2001	24.5	30.0	27.5	2007	21.0	27.9	23.4
2005	25.8	32.8	28.6	2007	21.9	28.3	24.6	2008	25.4	32.0	28.1
2007	24.1	30.0	26.8	2011	25.4	29.1	27.0	2009	22.3	29.5	25.5
2009	21.0	28.7	25.3	2013	28.7	34.3	31.1	2016	25.4	33.2	27.9
2016	22.3	27.8	25.8	2015	25.4	31.9	28.4	2021	25.7	32.6	28.7
2017	23.7	33.0	28.6	2016	23.3	31.6	27.2				
2018	23.3	33.2	28.6	2019	27.2	30.5	28.8				
2019	26.4	35.3	30.3	2020	24.2	30.8	26.9				
2020	24.7	32.3	28.5								
2021	27.5	35.7	31.2								
Octubre				Noviembre				Diciembre			
Año	Min.	Máx.	Media	Año	Min.	Máx.	Media	Año	Min.	Máx.	Media
1993	23.2	30.8	26.3	1995	20.1	26.6	22.7	1993	18.8	24.1	21.1
1994	24.1	30.8	26.8	1996	21.9	29.5	26.2	1996	14.7	22.3	19.0
1995	24.1	30.8	26.4	1997	23.2	29.5	26.5	1997	19.7	26.2	21.8
1996	25.8	34.4	29.5	1999	22.3	30.0	26.2	1998	17.9	24.1	21.3
1997	23.6	28.7	25.5	2001	23.2	32.0	27.1	1999	18.8	28.3	23.8
1998	14.7	25.4	25.0	2002	24.9	34.0	28.4	2000	21.5	27.9	24.0
1999	25.8	35.2	30.3	2003	22.8	30.4	25.1	2002	21.0	27.5	23.5
2000	23.6	31.2	26.4	2004	23.2	29.5	25.5	2003	19.2	26.2	22.5
2001	25.4	32.8	28.1	2005	24.1	32.4	27.6	2004	23.2	29.5	25.5
2002	25.8	34.0	28.6	2006	25.4	31.2	27.6	2006	24.1	32.4	27.2
2004	28.3	40.3	32.5	2008	26.2	34.4	29.3	2008	22.8	28.7	25.1

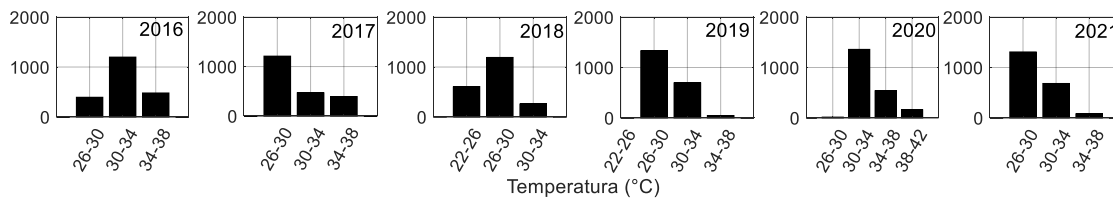
(continúa)

ANEXO D

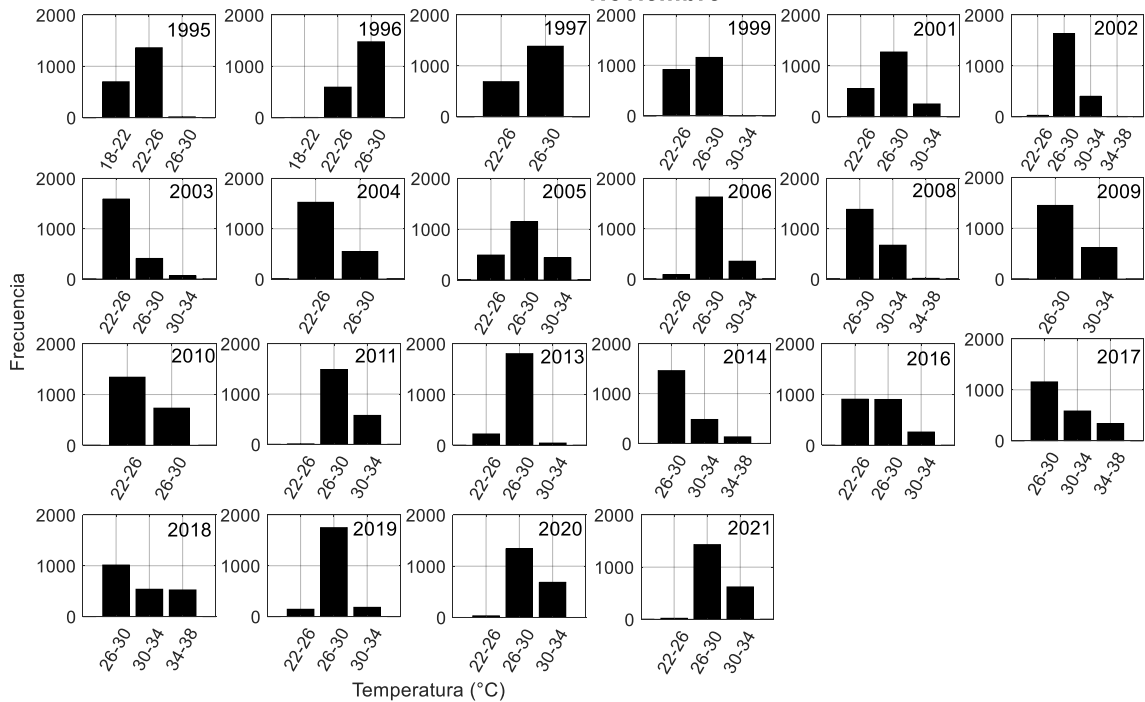
Histogramas de frecuencias de la temperatura superficial de la arena en el polígono de estudio de los meses de la temporada de anidación en las últimas décadas.



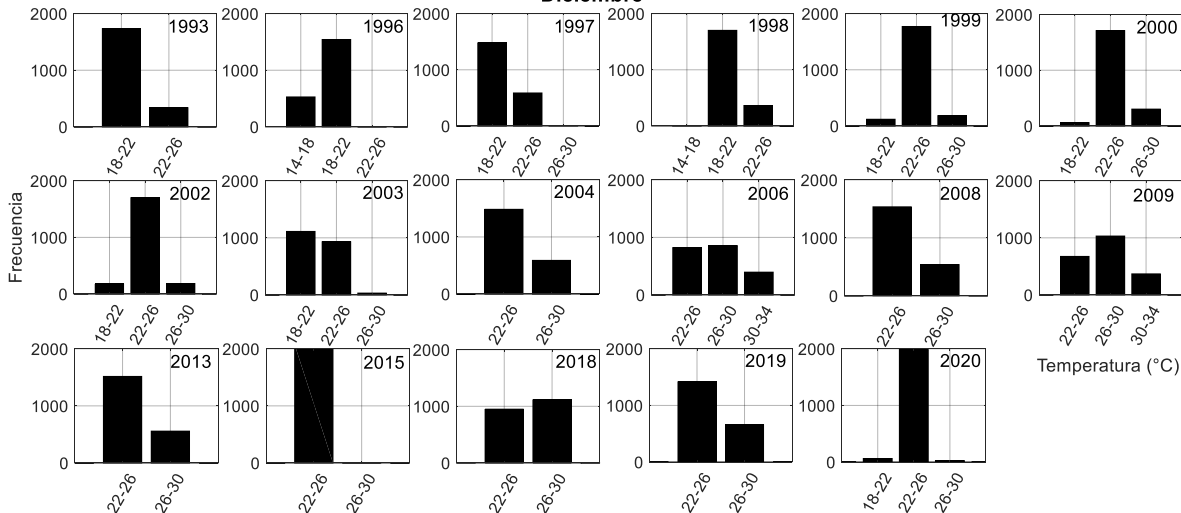
(continúa)



Noviembre



Diciembre



ANEXO E

Resultados de la prueba de Tukey ($p < 0.05$) para la comparación de medias de temperatura superficial de la arena en el mes de julio.

	1994	1996	1997	1998	2002	2005	2007	2009	2016	2017	2018	2019	2020
1996	-0.61												
1997	-2.58	-1.98											
1998	-1.39	-0.78	1.19										
2002	-5.45	-4.84	-2.86	-4.06									
2005	-4.58	-3.97	-2.00	-3.20	0.87								
2007	-2.78	-2.17	-0.19	-1.39	2.67	1.81							
2009	-1.18	-0.57	1.40	0.20	4.27	3.40	1.59						
2016	-1.74	-1.13	0.85	-0.35	3.71	2.85	1.04	-0.55					
2017	-4.56	-3.95	-1.98	-3.18	0.89	0.02	-1.79	-3.38	-2.83				
2018	-4.52	-3.91	-1.93	-3.13	0.93	0.06	-1.74	-3.34	-2.78	0.04			
2019	-6.19	-5.58	-3.60	-4.80	-0.74	-1.60	-3.41	-5.00	-4.45	-1.62	-1.67		
2020	-4.44	-3.83	-1.85	-3.05	1.01	0.14	-1.66	-3.25	-2.70	0.13	0.08	1.75	
2021	-7.16	-6.55	-4.58	-5.78	-1.71	-2.58	-4.39	-5.98	-5.43	-2.60	-2.64	-0.98	-2.72

Nota: los cuadros sombreados en gris indican diferencias significativas.

Resultados de la prueba de Tukey ($p < 0.05$) para la comparación de medias de temperatura superficial de la arena en el mes de agosto.

	1993	1994	1997	2000	2001	2007	2011	2013	2015	2016	2019
1994	2.42										
1997	-0.47	-2.89									
2000	-5.88	-8.31	-5.42								
2001	-1.29	-3.71	-0.82	4.59							
2007	1.58	-0.84	2.04	7.46	2.87						
2011	-0.79	-3.21	-0.32	5.10	0.50	-2.36					
2013	-4.85	-7.27	-4.38	1.04	-3.56	-6.42	-4.06				
2015	-2.21	-4.63	-1.74	3.68	-0.92	-3.79	-1.42	2.64			
2016	-0.99	-3.42	-0.53	4.89	0.29	-2.57	-0.21	3.85	1.21		
2019	-2.58	-5.00	-2.11	3.30	-1.29	-4.16	-1.80	2.26	-0.37	-1.59	
2020	-0.66	-3.08	-0.19	5.23	0.63	-2.24	0.13	4.19	1.55	0.34	1.92

Nota: los cuadros sombreados en gris indican diferencias significativas.

Resultados de la prueba de Tukey ($p < 0.05$) para la comparación de medias de temperatura superficial de la arena en el mes de septiembre.

	1996	1999	2001	2005	2007	2008	2009	2016
1999	-7.27							
2001	-1.82	5.45						
2005	-1.23	6.04	0.59					
2007	-0.16	7.11	1.66	1.07				
2008	-4.93	2.34	-3.11	-3.70	-4.77			
2009	-2.33	4.94	-0.51	-1.10	-2.17	2.60		
2016	-4.72	2.55	-2.90	-3.49	-4.56	0.21	-2.39	
2021	-5.52	1.74	-3.71	-4.30	-5.37	-0.59	-3.19	-0.80

Nota: los cuadros sombreados en gris indican diferencias significativas.

Resultados de la prueba de Tukey ($p < 0.05$) para la comparación de medias de temperatura superficial de la arena en el mes de octubre.

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2004	2005	2006	2008	2010	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
1994	-0.51																							
1995	-0.11	0.39																						
1996	-3.24	-2.73	-3.12																					
1997	0.77	1.28	0.89	4.01																				
1998	1.36	1.86	1.47	4.59	0.59																			
1999	-4.04	-3.53	-3.92	-0.80	-4.81	-5.40																		
2000	-0.07	0.44	0.05	3.17	-0.84	-1.42	3.97																	
2001	-1.74	-1.23	-1.63	1.50	-2.51	-3.10	2.30	-1.67																
2002	-2.33	-1.82	-2.21	0.91	-3.10	-3.69	1.71	-2.26	-0.59															
2004	-6.15	-5.64	-6.03	-2.91	-6.92	-7.50	-2.11	-6.08	-4.41	-3.82														
2005	0.12	0.63	0.23	3.36	-0.65	-1.24	4.16	0.19	1.86	2.45	6.27													
2006	-2.27	-1.77	-2.16	0.96	-3.05	-3.63	1.76	-2.21	-0.53	0.05	3.87	-2.40												
2008	-3.67	-3.16	-3.56	-0.43	-4.44	-5.03	0.37	-3.60	-1.93	-1.34	2.48	-3.79	-1.39											
2010	-2.40	-1.90	-2.29	0.83	-3.18	-3.76	1.64	-2.34	-0.66	-0.07	3.74	-2.52	-0.13	1.27										
2013	-5.32	-4.81	-5.20	-2.08	-6.09	-6.67	-1.28	-5.25	-3.58	-2.99	0.83	-5.44	-3.04	-1.65	-2.91									
2014	-1.35	-0.84	-1.23	1.89	-2.12	-2.70	2.69	-1.28	0.40	0.98	4.80	-1.47	0.93	2.32	1.06	3.97								
2015	-2.44	-1.94	-2.33	0.79	-3.22	-3.80	1.60	-2.38	-0.70	-0.11	3.70	-2.56	-0.17	1.23	-0.04	2.87	-1.10							
2016	-5.48	-4.98	-5.37	-2.25	-6.26	-6.84	-1.45	-5.42	-3.74	-3.16	0.66	-5.61	-3.21	-1.81	-3.08	-0.17	-4.14	-3.04						
2017	-4.42	-3.91	-4.31	-1.18	-5.19	-5.78	-0.38	-4.35	-2.68	-2.09	1.73	-4.54	-2.14	-0.75	-2.02	0.90	-3.07	-1.98	1.07					
2018	-1.01	-0.51	-0.90	2.22	-1.79	-2.37	3.02	-0.95	0.73	1.31	5.13	-1.13	1.26	2.66	1.39	4.30	0.33	1.43	4.47	3.41				
2019	-3.58	-3.07	-3.47	-0.34	-4.35	-4.94	0.46	-3.52	-1.84	-1.25	2.56	-3.70	-1.31	0.09	-1.18	1.73	-2.24	-1.14	1.90	0.84	-2.57			
2020	-6.97	-6.46	-6.85	-3.73	-7.74	-8.32	-2.93	-6.90	-5.23	-4.64	-0.82	-7.09	-4.69	-3.30	-4.56	-1.65	-5.62	-4.52	-1.48	-2.55	-5.95	-3.38		
2021	-3.50	-2.99	-3.39	-0.26	-4.27	-4.86	0.54	-3.43	-1.76	-1.17	2.65	-3.62	-1.23	0.17	-1.10	1.82	-2.15	-1.06	1.98	0.92	-2.49	0.08	3.47	

Nota: los cuadros sombreados en gris indican diferencias significativas.

Resultados de la prueba de Tukey ($p < 0.05$) para la comparación de medias de temperatura superficial de la arena en el mes de noviembre.

	1995	1996	1997	1999	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2016	2017	2018	2019	2020	
1996	-3.54																					
1997	-3.82	-0.28																				
1999	-3.49	0.05	0.33																			
2001	-4.40	-0.86	-0.58	-0.91																		
2002	-5.71	-2.17	-1.88	-2.22	-1.31																	
2003	-2.45	1.09	1.38	1.04	1.95	3.26																
2004	-2.96	0.58	0.86	0.53	1.44	2.74	-0.51															
2005	-4.90	-1.36	-1.08	-1.42	-0.51	0.80	-2.46	-1.94														
2006	-4.94	-1.40	-1.12	-1.46	-0.55	0.76	-2.50	-1.98	-0.04													
2008	-6.59	-3.05	-2.76	-3.10	-2.19	-0.88	-4.14	-3.62	-1.68	-1.64												
2009	-6.57	-3.03	-2.75	-3.08	-2.17	-0.86	-4.12	-3.61	-1.66	-1.63	0.02											
2010	-3.11	0.43	0.71	0.38	1.29	2.60	-0.66	-0.15	1.80	1.84	3.48	3.46										
2011	-5.97	-2.43	-2.15	-2.48	-1.57	-0.26	-3.52	-3.01	-1.07	-1.03	0.62	0.60	-2.86									
2013	-4.53	-0.99	-0.71	-1.04	-0.13	1.18	-2.08	-1.57	0.38	0.41	2.06	2.04	-1.42	1.44								
2014	-6.55	-3.01	-2.73	-3.06	-2.15	-0.84	-4.10	-3.59	-1.65	-1.61	0.04	0.02	-3.44	-0.58	-2.02							
2016	-4.27	-0.73	-0.45	-0.79	0.12	1.43	-1.83	-1.31	0.63	0.67	2.31	2.29	-1.17	1.70	0.25	2.28						
2017	-8.09	-4.55	-4.27	-4.60	-3.69	-2.38	-5.64	-5.13	-3.19	-3.15	-1.50	-1.52	-4.98	-2.12	-3.56	-1.54	-3.81					
2018	-8.73	-5.19	-4.91	-5.24	-4.33	-3.02	-6.28	-5.77	-3.82	-3.78	-2.14	-2.16	-5.62	-2.76	-4.20	-2.18	-4.45	-0.64				
2019	-4.90	-1.36	-1.08	-1.41	-0.50	0.81	-2.45	-1.94	0.01	0.05	1.69	1.67	-1.79	1.07	-0.37	1.65	-0.62	3.19	3.83			
2020	-6.11	-2.57	-2.29	-2.63	-1.72	-0.41	-3.67	-3.15	-1.21	-1.17	0.47	0.45	-3.01	-0.14	-1.59	0.44	-1.84	1.98	2.61	-1.22		
2021	-5.98	-2.44	-2.16	-2.49	-1.58	-0.28	-3.54	-3.02	-1.08	-1.04	0.60	0.59	-2.88	-0.01	-1.45	0.57	-1.71	2.11	2.75	-1.08	0.13	

Nota: los cuadros sombreados en gris indican diferencias significativas.

Resultados de la prueba de Tukey ($p < 0.05$) para la comparación de medias de temperatura superficial de la arena en el mes de noviembre.

	1993	1996	1997	1998	1999	2000	2002	2003	2004	2006	2008	2009	2013	2015	2018	2019
1996	2.14															
1997	-0.66	-2.80														
1998	-0.20	-2.33	0.47													
1999	-2.71	-4.84	-2.04	-2.51												
2000	-2.84	-4.97	-2.17	-2.64	-0.13											
2002	-2.35	-4.49	-1.69	-2.16	0.35	0.48										
2003	-1.33	-3.46	-0.66	-1.13	1.38	1.51	1.03									
2004	-4.39	-6.52	-3.72	-4.19	-1.68	-1.55	-2.03	-3.06								
2006	-6.04	-8.18	-5.38	-5.85	-3.34	-3.21	-3.69	-4.72	-1.66							
2008	-3.93	-6.06	-3.26	-3.73	-1.22	-1.09	-1.57	-2.60	0.46	2.12						
2009	-6.18	-8.32	-5.52	-5.99	-3.48	-3.35	-3.83	-4.86	-1.80	-0.14	-2.26					
2013	-3.69	-5.83	-3.03	-3.49	-0.98	-0.85	-1.34	-2.36	0.70	2.35	0.24	2.49				
2015	-2.89	-5.02	-2.22	-2.69	-0.18	-0.05	-0.53	-1.56	1.50	3.16	1.04	3.30	0.80			
2018	-5.21	-7.35	-4.55	-5.02	-2.51	-2.38	-2.86	-3.89	-0.83	0.83	-1.29	0.97	-1.52	-2.33		
2019	-3.78	-5.91	-3.12	-3.58	-1.07	-0.94	-1.43	-2.45	0.61	2.26	0.15	2.40	-0.09	-0.89	1.43	
2020	-2.48	-4.61	-1.81	-2.28	0.23	0.36	-0.13	-1.15	1.91	3.56	1.45	3.70	1.21	0.41	2.73	1.30

Nota: los cuadros sombreados en gris indican diferencias significativas.

ANEXO F

Resultados de la prueba de Tukey ($p < 0.05$) para la comparación de medias de temperatura ambiental registrada con sensores *in situ*.

	Diferencia	Valor de p
Julio		
2009 vs 2010	5.74	0
Agosto		
2009 vs 2010	4.14	0
2009 vs 2019	2.93	0
2009 vs 2020	4.81	0
2010 vs 2019	-1.22	0
2010 vs 2020	0.67	0
2019 vs 2020	1.88	0
Septiembre		
2009 vs 2010	3.88	0
2009 vs 2019	1.41	0
2009 vs 2020	3.35	0
2010 vs 2019	-2.47	0
2010 vs 2020	-0.53	0
2019 vs 2020	1.94	0
Octubre		
2009 vs 2010	4.60	0
2009 vs 2019	-0.27	0.48
2009 vs 2020	1.12	0
2010 vs 2019	-4.87	0
2010 vs 2020	-3.48	0
2019 vs 2020	1.39	0
Noviembre		
2009 vs 2010	7.71	0
2009 vs 2019	1.19	0
2009 vs 2020	5.08	0
2010 vs 2019	-6.52	0
2010 vs 2020	-2.64	0
2019 vs 2020	3.88	0
Diciembre		
2009 vs 2010	5.6	0
2009 vs 2019	-1.1	0.80
2009 vs 2020	1.3	0
2010 vs 2019	-6.7	0
2010 vs 2020	-4.2	0
2019 vs 2020	2.56	0.21

Nota: los cuadros sombreados en gris indican diferencias significativas.