



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Efectos de la lluvia en las deformaciones de la superficie terrestre usando observaciones de GPS de alta resolución.

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A (N)

Gabriela Alvarado Santiago

DIRECTOR(A) DE TESIS

Dr. Miguel Ángel Santoyo García Galiano



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Primero agradezco a mi familia, a mi madre y a mi padre, que me apoyo siempre, desde el ámbito personal hasta el académico. Y que en especial en este último siempre hicieron todo lo posible por brindarme educación. A mis hermanos que con su compañía y humor hicieron más fácil esta etapa de mi vida.

Así mismo agradezco a mi tutor el Dr. Miguel Ángel Santoyo quien me guio a lo largo de esta tesis, en especial le reconozco su paciencia y disposición a ayudarme todas la veces que fue necesario. Gracias por los conocimientos y consejo que me compartió en este camino que aún estoy comenzando.

Un especial agradecimiento al Dr. Allen Husker quien me mostro por primera vez el mundo de la investigación en sismología y quien me inspiro a continuar en este camino. De la misma forma, es parte importante de este trabajo porque comenzó como mi tutor de tesis y aunque no le fue posible continuar como tal, si me proporciono las bases necesarias para el desarrollo de esta.

Agradezco a la facultad de Ingeniería por ser el lugar donde mi formación comenzó y a todos los profesores que compartieron sus conocimientos y experiencias conmigo.

Índice general

Agradecimientos	2
Índice de figuras	1
Índice de tablas	2
Resumen.....	3
Abstract	4
Capítulo 1. Introducción	5
1.1 Objetivo general.....	5
1.2 Justificación	5
Capítulo 2. Antecedentes.....	6
Capítulo 3. Marco teórico	10
3.1 Deformación de la corteza	10
3.1.1 Esfuerzo.....	10
3.1.2 Deformación.....	11
3.2 Sistema Global de Navegación por Satélite GNSS.....	13
3.3 Global Positioning System GPS.....	13
3.3.1 Segmento espacial	14
3.3.2 Segmento de control.....	14
3.4. Ecuaciones de Boussinesq.....	16
3.4.1. Ecuaciones fundamentales	17
3.4.2. Problema de Boussinesq	18
Capítulo 4. Área de estudio.....	21
4.1 Ubicación.....	21
4.4 Cuenca Laguna Tuxpan.....	22
4.2 Geología y Edafología.....	24
4.3 Topografía e hidrología	25
4.4. Clima.....	26
Capítulo 5. Metodología.....	28
5.1 Obtención de datos.....	28
5.1.1. Datos de lluvia	28
5.1.2. Señales GPS	29
5.2. Comparación de datos GPS y señales de lluvia.....	30
5.3 Cálculo de la deformación en superficie	36

Capítulo 6. Resultados.....	41
Capítulo 7. Conclusiones	45
Capítulo 8. Referencias	46
Capítulo 9. Anexos.....	49
A) Código de MATLAB.....	49
B) Señal GPS vs lluvia.....	50

Índice de figuras

Figura 1. Aumento del nivel de agua superficial en los cinco Grandes Lagos desde octubre de 2012 hasta octubre de 2019 medido por medidores de nivel de agua. La cuenca de drenaje del Gran Lago (contorno marrón) está definida por todos los ríos que desembocan en los Grandes Lagos. Tomado de Argus, 2020.	7
Figura 2. Comparación de la corrección estacional en la estación GNSS KLDN en Nepal a partir del modelo GRACE y la reconstrucción variacional del análisis de componentes independiente bayesiano (vbICA). (a) Componentes verticales, este y norte de los conjuntos de datos geodésicos de promedio móvil de 10 días sin tendencia (gris) y del modelo GRACE (rojo) con el error absoluto medio (MAE) indicado en la esquina superior derecha. (b) Serie de tiempo GNSS corregida por señal estacional (a través de la resta del modelo GRACE). (c y d) Igual que (a) y (b) pero para la reconstrucción vbICA (negro) propuesta en este estudio. Como lo indican los valores MAE y los residuos en (b) y (d), la reconstrucción vbICA funciona mejor para eliminar las señales estacionales en la serie de tiempo GNSS original. Tomado de Larochelle, S. 2018.	9
Figura 3. Tipos de esfuerzos, de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha: esfuerzo tensional, compresional y esfuerzo cortante. Tomado de Johnson, C., 2017	11
Figura 4. Gráfica de esfuerzos contra deformaciones de distintos materiales. Tomado de Johnson, C., 2017	12
Figura 5. Red de 24 satélites GPS. Tomado de U.S. National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing. (s.f.).....	14
Figura 6. Ubicación de la estación de control, estaciones de monitoreo y antenas en Tierra. Tomado de Federal Aviation Administration, U.S. (s.f.).	16
Figura 7. Mapa de ubicación del área de estudio. Se señala con una flecha color rojo el municipio donde se localiza.	22
Figura 8. Mapa de la región hidrológica 18 Rio Balsas y las subcuencas que lo conforman.....	23
Figura 9. Mapa geológico del área de estudio	25
Figura 10. Modelo digital de elevación del suelo de las subcuencas. Mapa hidrológico de la Laguna de Tuxpan y río Tomatal (Tomado de IMTA2013).	26
Figura 11. Comportamiento de la precipitación y la temperatura entre 1981 y 2009 en la estación meteorológica Laguna de Tuxpan, Gro. (Modificada de IMTA 2013).	27
Figura 12. Precipitación media anual para las subcuencas de la laguna de Tuxpan y el río Tomatal (Modificada de IMTA 2013).	27
Figura 13. Datos mostrados en una Estación Meteorológica Autónoma. Caso de la estación meteorológica más cercana a la estación GPS IGUA	29
Figura 14. Estación de GPS YAIG. Gráfica de desplazamiento Norte- sur, este- oeste y vertical .	30
Figura 15. Gráfica de desplazamiento vertical registrado en la estación DEMA	31
Figura 16. Gráfica de acumulación de lluvia vs tiempo y la componente vertical de desplazamiento de la estación DEMA. La serie de puntos azules se refiere a la lluvia y los puntos en color verde representan el desplazamiento.	32
Figura 17. Gráfica de acumulación de lluvia vs tiempo y la componente vertical de desplazamiento de la estación ICEP. La serie de puntos azules se refiere a la lluvia y los puntos en color verde representan el desplazamiento.	32
Figura 18. Mapa que muestra las estaciones GPS afectadas	34

Figura 19. Gráfica del desplazamiento vertical (puntos amarillos) y la lluvia sin tendencia (puntos azules) para la estación IGUA.	35
Figura 20. Gráfica del desplazamiento horizontal en dirección Este (puntos amarillos) y la lluvia sin tendencia (puntos azules) para la estación IGUA.	36
Figura 21. Mapa del área seleccionada para el cálculo de difracciones.	37
Figura 22. Distribución teórica de la cuenca Laguna Tuxpan	38
Figura 23. Gráfica de acumulación de lluvia y desplazamiento vertical durante los últimos 10 años en la estación TNAT. La serie de puntos azules se refiere a la lluvia y los puntos en color verde representan el desplazamiento.	41
Figura 24. Gráfica de acumulación de lluvia y desplazamiento vertical durante los últimos 10 años en la estación TNGF. La serie de puntos azules se refiere a la lluvia y los puntos en color verde representan el desplazamiento.	42
Figura 25. Gráfica de la componente vertical del GPS (puntos amarillos) y de la serie de desplazamiento vertical calculada (puntos anaranjados) para el periodo de tiempo de 2011 a 2020.....	44
Figura 26. Gráfica de la componente vertical del GPS (puntos amarillos), serie de desplazamiento vertical calculada (puntos anaranjados) y lluvia (puntos azules) para el periodo de tiempo de 2011 a 2020.....	44

Índice de tablas

Tabla 1. Distribución de área dentro de la cuenca Laguna Tuxpan	23
Tabla 2. Estaciones utilizadas en este análisis.....	34
Tabla 3. Medidas y parámetros de cálculo utilizados para el cálculo de la distribución teórica de la cuenca.	39
Tabla 4. Parámetro para el cálculo de desplazamiento por carga vertical.....	40
Tabla 5. Tabla del módulo de Young en GPa y la relación de Poisson para algunas rocas.	40
Tabla 6. Listado de las estaciones donde se aprecia una posible relación entre los efectos de la lluvia y el desplazamiento GPS.	43

Resumen

La observación del desplazamiento vertical de la superficie terrestre mediante señales de GPS en diversos sitios en México, ha mostrado la existencia de ciclos anuales a lo largo del tiempo y que estos coinciden con la cantidad de lluvia registrada en la misma zona y en periodos de tiempo similares. En este trabajo se realizó la comparación entre las señales de GPS y la lluvia registrada en algunas estaciones GPS ubicadas en el centro y sur de México. Con el fin de comprobar si el desplazamiento puede haber sido producido por la lluvia, se eligió el sitio de la estación IGUA que muestra similitudes claras entre la precipitación pluvial y las deformaciones; así mismo, se seleccionó esta estación por su cercanía a un cuerpo de agua, en este caso la Laguna Tuxpan, ubicada en Guerrero, México. En dicha cuenca se realizó el cálculo analítico del desplazamiento vertical para una cuenca semi-elipsoidal que representase a la de la Laguna Tuxpan, y mediante las ecuaciones de Boussinesq se obtuvo una señal de desplazamiento vertical producido por los mismos datos de lluvia registrados en esa estación y comparados anteriormente con el desplazamiento medido con GPS. El desplazamiento obtenido de forma matemática se ajusta adecuadamente con los datos de lluvia al igual que la señal de GPS, por lo cual se observa que la deformación presente en el suelo puede ser debido a las cargas de agua producto de la lluvia.

Abstract

The observation of the vertical displacement of the earth's surface using GPS signals in several places in Mexico has shown the existence of annual cycles over time and that these coincide with the amount of rain recorded in the same area and in periods of time. Similar. In this work, the comparison between the GPS signals and the rain registered in some GPS stations located in the center and south of Mexico was made. To check if the displacement could have been caused by rain, the site of the IGUA station was chosen, which shows clear similarities between rainfall and deformations; likewise, this station was selected because of its proximity to a body of water, in this case, Laguna Tuxpan, located in Guerrero, Mexico. In this basin, the analytical calculation of the vertical displacement was carried out for a semi-ellipsoidal basin that represented that of Laguna Tuxpan, and using the Boussinesq equations a vertical displacement signal was obtained produced by the same rainfall data recorded in that station and previously compared with the displacement measured with GPS. The displacement obtained mathematically is properly adjusted with the rain data as well as the GPS signal, for which it is observed that the deformation present in the soil may be due to the water loads produced by the rain.

Capítulo 1. Introducción

La medición de desplazamientos de la superficie de la tierra mediante el uso de GPS es una herramienta muy útil para determinar las deformaciones en el suelo que, a simple vista no son notorias pero que pueden estar sucediendo debido a diversos factores, tales como los producidos por la tectónica regional, la ocurrencia de eventos sísmicos, deslizamientos lentos, así como cambios en la cantidad de agua en el subsuelo en amplias zonas, entre otros. Dichos cambios en la cantidad de agua pueden estar a su vez, relacionados con la lluvia y el deshielo. La importancia de su estudio radica en la necesidad de una mejor comprensión de los fenómenos hidrológicos y el aprovechamiento de los datos de desplazamiento en zonas donde se tiene una mayor densidad de estaciones GPS (e.g. Argus et al., 2020).

Es por ello que, en este trabajo se propone mostrar la posible relación que existe entre las deformaciones del terreno y la cantidad de lluvia en 43 sitios donde se encuentran estaciones GPS y que se encuentran repartidas en el centro y sur de México. Así mismo, se busca comprobar matemáticamente mediante un cálculo computacional, si es posible que la cantidad de lluvia registrada en el área de estudio, en este caso la cuenca Laguna Tuxpan, ubicada en Guerrero, México provoque deformaciones de la magnitud registrada por el desplazamiento vertical de GPS en dicha zona. Esto, mediante la comparación de los desplazamientos verticales calculados teóricamente y los registrados por el GPS. El cálculo antes descrito se realizó mediante el modelado de una cuenca que represente un área de la cuenca Laguna Tuxpan y la aplicación de las ecuaciones de Boussinesq para encontrar las deformaciones teóricas, que una cuenca como la propuesta aquí es capaz de producir con cierta cantidad de precipitación pluvial.

1.1 Objetivo general

Determinar los posibles efectos de la lluvia sobre las deformaciones superficiales del terreno con base en datos GPS de alta resolución y el cálculo numérico de las deformaciones elásticas del subsuelo para la región de la cuenca de la Laguna Tuxpan, en el estado de Guerrero, México.

1.2 Justificación

La medición de desplazamientos de la superficie terrestre mediante GPS de alta precisión es una herramienta esencial para el estudio de los fenómenos sismotectónicos de la corteza terrestre. Dichos desplazamientos del suelo pueden incluir, además de los corticales, otros factores superficiales tales como cambios en la cantidad de agua en el subsuelo. Estos a su

vez, pueden estar relacionados con las precipitaciones pluviales. La importancia de su análisis radica en la necesidad de estudiar integralmente dichas deformaciones de la corteza a fin de tener una mejor comprensión de los fenómenos tanto sismotectónicos como la influencia de los fenómenos hidrológicos en el subsuelo de una región.

Capítulo 2. Antecedentes

En un trabajo publicado por Argus (2020), se busca integrar las mediciones de GPS de desplazamientos elásticos de la tierra y las observaciones de gravedad pertenecientes al Experimento de Recuperación de Gravedad y Clima (GRACE por sus siglas en inglés) que es un programa de la NASA, con el objetivo de inferir cambios en la cantidad de agua en la superficie de la Tierra; así mismo se busca en ese estudio refinar la imagen de GRACE de cambio en el agua total, agregando datos de GPS en lugares con una gran densidad de sitios de GPS.

El estudio se centró en el aumento en los niveles de agua en los grandes lagos, en los Estados Unidos, y que fue de entre 0.7 y 1.5 m en un periodo de 2013 a 2019 (Figura 1); lo anterior, aumentó el volumen de agua superficial en 285 km³. La respuesta elástica del suelo al aumento de la carga en estos Grandes Lagos fue un hundimiento de 8 mm a 23 mm y la tierra adyacente descendió de 3 mm a 14 mm.

En dicho estudio se utilizan los sistemas de posicionamiento global como una técnica efectiva para inferir cambios en el almacenamiento total del agua, en donde se invirtieron los desplazamientos verticales del GPS para inferir cambios en el agua de la superficie de la Tierra en función del tiempo (Argus et al., 2014; Borsa et al., 2014; Fu et al., 2015).

Para la integración de los datos de GPS con los datos de GRACE primero se eliminó la firma elástica de los cambios en las aguas superficiales de los Grandes Lagos de las mediciones de GRACE y GPS y luego se eliminó la respuesta viscosa de la Tierra sólida a la descarga de las capas de hielo del Pleistoceno tardío de los datos del GPS (el ajuste isostático glacial ya se eliminó de los datos de GRACE). Luego se evaluó el GPS restante y GRACE señala como cambios en el agua en la tierra en la cuenca de los Grandes Lagos. Este estudio avanza en la comprensión de una variedad de fenómenos del ciclo del agua y de la Tierra sólida (Argus et al., 2020).

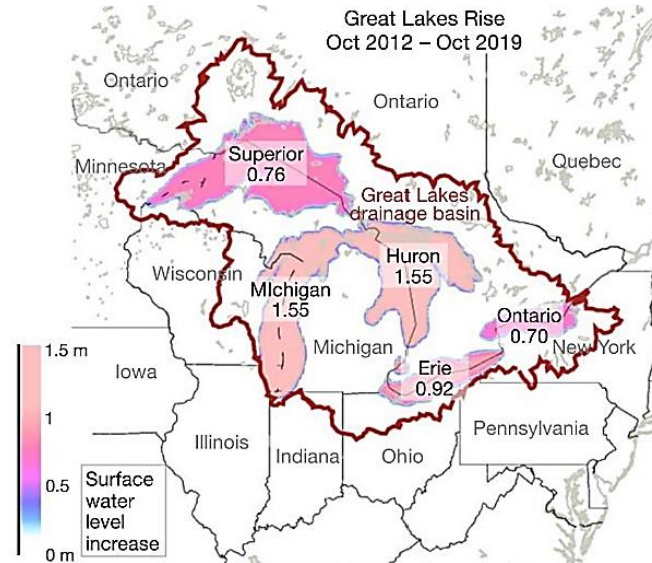


Figura 1. Aumento del nivel de agua superficial en los cinco Grandes Lagos desde octubre de 2012 hasta octubre de 2019 medido por medidores de nivel de agua. La cuenca de drenaje del Gran Lago (contorno marrón) está definida por todos los ríos que desembocan en los Grandes Lagos. Tomado de Argus, 2020.

En otro estudio publicado por Larochelle (2018) se señala que cada año a través de series de tiempo del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), se observan señales estacionales las cuales pueden explicarse, en primer orden, por la respuesta de la Tierra a las variaciones en las cargas superficiales, en su mayoría debidas a redistribuciones de la masa de agua continental (Blewitt et al., 2001; Dong et al., 2002; van Dam et al., 2001). Larochelle resalta que identificar y extraer señales estacionales no tectónicas de las mediciones geodésicas es fundamental para detectar posibles señales tectónicas de pequeña amplitud, clave para nuestra comprensión del ciclo sísmico (p. ej., eventos de deslizamiento lento y temblores, deslizamiento postsísmico y esfuerzos intersísmicos).

Larochelle propone un procedimiento que combina la solidez física de un modelo basado en GRACE con la precisión estadística del algoritmo vbICA (Gualandi et al., 2016) para descomponer los conjuntos de datos de desplazamiento (GNSS y deformación derivada de GRACE), en un número finito de componentes, conservar las señales estacionales y describirlos en términos de procesos físicos subyacentes.

Por un lado, los satélites GRACE obtienen modelos de desplazamientos de la superficie de la Tierra inducidos por las variaciones de la carga superficial, que, aunque pueden explicar gran parte de las observaciones anuales del GNSS, aún existen discrepancias entre el modelo y los datos (Larochelle, 2018). Por otro lado, el problema se puede abordar como un problema de separación de fuentes ocultas (ciegas), donde los desplazamientos observados son el resultado de varias fuentes mixtas. Con este fin, se puede aplicar un análisis de componentes independientes (ICA) al conjunto de datos de desplazamiento para diferenciar, de manera estadística, los diferentes procesos físicos observados. En este caso

se usó la forma bayesiana variacional de ICA (vbICA) que puede extraer objetivamente señales estacionales de series temporales de GNSS; sin embargo, la técnica por sí sola no proporciona información sobre sus orígenes.

Los datos de GNSS y GRACE que considera este estudio, se ubican en la Península Arábiga y Nepal. Para cada área se seleccionaron 14 estaciones con registros durante el rango de tiempo (2007.0, 2012.5) de tal manera que las estaciones se distribuyen aproximadamente uniformemente en la región.

Las series de tiempo geodésicas se eliminan de la tendencia y se corrigen simultáneamente para las discontinuidades escalonadas mediante el ajuste de mínimos cuadrados de una tendencia lineal, sinusoides anuales y semestrales, y términos de compensación donde sea visualmente obvio, en épocas correspondientes a cambios de equipo y desplazamientos cosísmicos. Así mismo, eliminaron la tendencias porque se estaban comparando conjuntos de datos derivados de GNSS y GRACE, ya que es posible que no muestren las mismas tendencias a largo plazo (p. ej., la deformación intersísmica puede estar presente en el conjunto de datos GNSS pero no en GRACE). Esto significa que, aquí, solo estaban comparando las variaciones de las tendencias lineales relativas de los dos conjuntos de datos. Los valores atípicos se eliminan de las tres series de tiempo en relación con una estación determinada. Las soluciones de posición diarias también se promedian durante un período de 10 días para que coincidan con la resolución temporal de los datos de GRACE. La Figura 2 muestra un ejemplo de serie temporal GNSS limpia en la estación KLDN en Nepal.

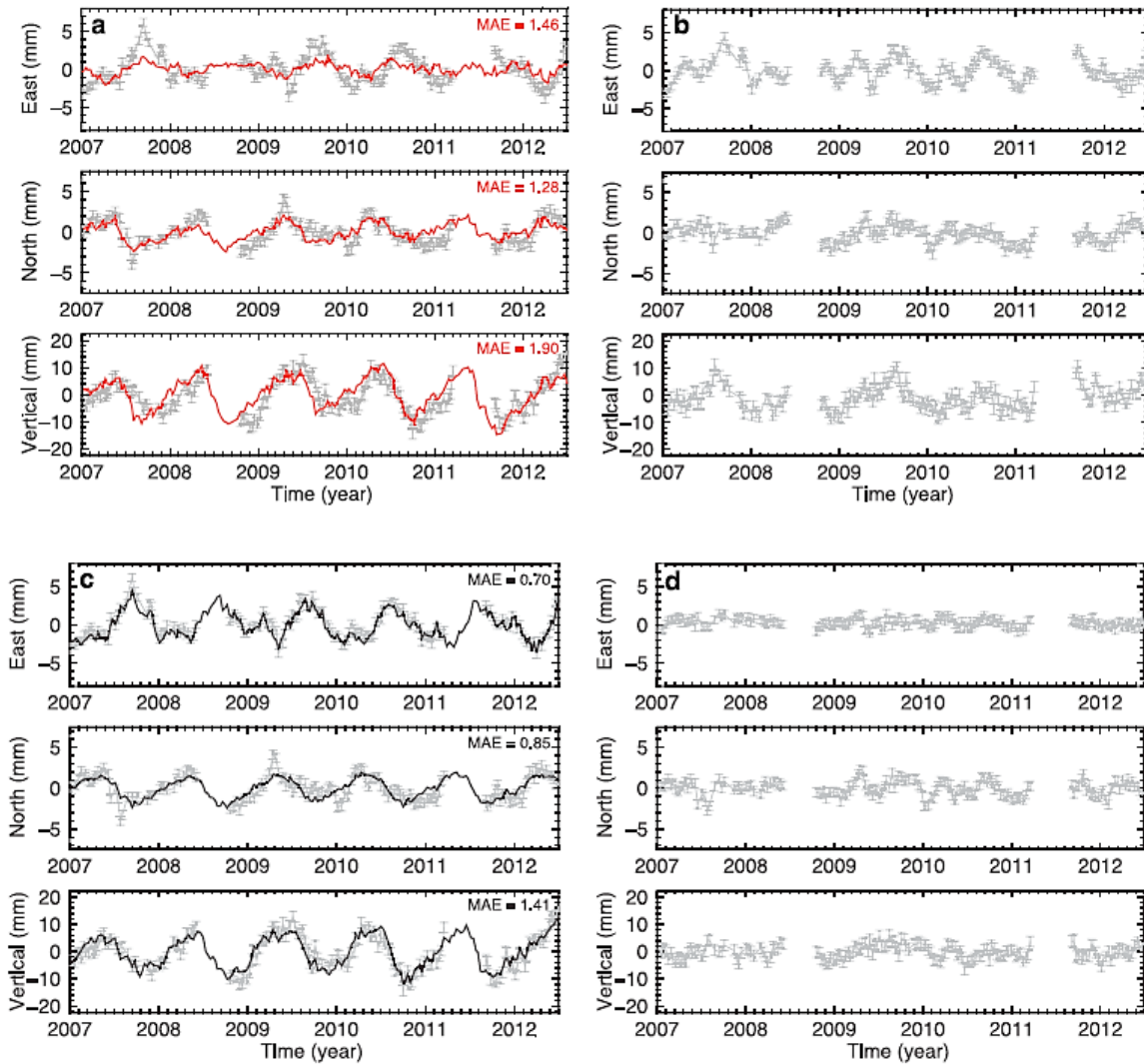


Figura 2. Comparación de la corrección estacional en la estación GNSS KLDN en Nepal a partir del modelo GRACE y la reconstrucción variacional del análisis de componentes independiente bayesiano (vbICA). (a) Componentes verticales, este y norte de los conjuntos de datos geodésicos de promedio móvil de 10 días sin tendencia (gris) y del modelo GRACE (rojo) con el error absoluto medio (MAE) indicado en la esquina superior derecha. (b) Serie de tiempo GNSS corregida por señal estacional (a través de la resta del modelo GRACE). (c y d) Igual que (a) y (b) pero para la reconstrucción vbICA (negro) propuesta en este estudio. Como lo indican los valores MAE y los residuos en (b) y (d), la reconstrucción vbICA funciona mejor para eliminar las señales estacionales en la serie de tiempo GNSS original. Tomado de Larochelle, S. 2018.

Capítulo 3. Marco teórico

3.1 Deformación de la corteza

La deformación de la corteza ocurre cuando las fuerzas aplicadas superan la rigidez interna de las rocas, cambiando físicamente sus formas. Las fuerzas por unidad de área son los esfuerzos, y los cambios espaciales que crean son las deformaciones (strain). Las fuerzas involucradas en los procesos tectónicos, así como la gravedad y, por ejemplo el emplazamiento de plutones ígneos, producen deformaciones en las rocas que incluyen pliegues, fracturas y fallas. Cuando la roca experimenta grandes cantidades de esfuerzo cortante y se rompe con una deformación rápida y quebradiza, la energía se libera en forma de ondas sísmicas, comúnmente conocidas como terremotos.

La deformación de la corteza es un campo fuertemente impulsado por los datos. Para medir los movimientos de la superficie terrestre, se emplea una variedad de métodos, incluidos LIDAR, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y el Radar Interferométrico de Apertura Sintética (InSAR). En zonas con sismicidad de magnitud poco relevante registrada históricamente o donde la sismicidad de fondo es escasa, los datos geodésicos pueden proporcionar la única información sobre el peligro sísmico actual. Los movimientos capturados por estas diversas técnicas de medición brindan información vital sobre:

- Los movimientos tectónicos lentos de "fondo" entre las placas de la tierra, lo que disminuye la acumulación de esfuerzo en las fallas.
- Las compensaciones a través de fallas progresivas (e.g. la falla de Hayward) que dan como resultado movimientos constantes (generalmente varios milímetros por año) de bloques de corteza que se mueven entre sí a lo largo de un límite de falla común.
- Las compensaciones a través de una falla durante un gran terremoto (los desplazamientos cosísmicos).
- Movimientos de descomposición rápida que persisten durante semanas o años después de un gran terremoto, que surgen de una combinación de deslizamiento continuo en la falla ("deslizamiento posterior") y posiblemente su extensión hacia la corteza inferior y el flujo de roca en la corteza inferior más profunda y el manto, donde la temperatura es lo suficientemente alta para permitir el flujo dúctil

3.1.1 Esfuerzo

Esfuerzo se refiere a la fuerza ejercida por unidad de área y la deformación es el cambio físico que resulta en respuesta a esa fuerza. Cuando el esfuerzo aplicado es mayor que la resistencia interna de la roca, el esfuerzo resulta en deformación de la roca causada por el esfuerzo. El esfuerzo en las rocas se puede representar como un cambio en el volumen de la roca y/o la forma de la roca, así como la fractura de la roca. Hay tres tipos de esfuerzos: tensional, compresional y cortante (Figura 3). El estrés tensional implica fuerzas que tiran

en direcciones opuestas, lo que da como resultado una tensión que estira y adelgaza la roca. El estrés de compresión implica fuerzas que empujan juntas, y la deformación por compresión se manifiesta como el plegamiento y el engrosamiento de la roca. El esfuerzo cortante implica fuerzas transversales; la deformación se muestra como bloques opuestos o regiones del material moviéndose uno al lado del otro.

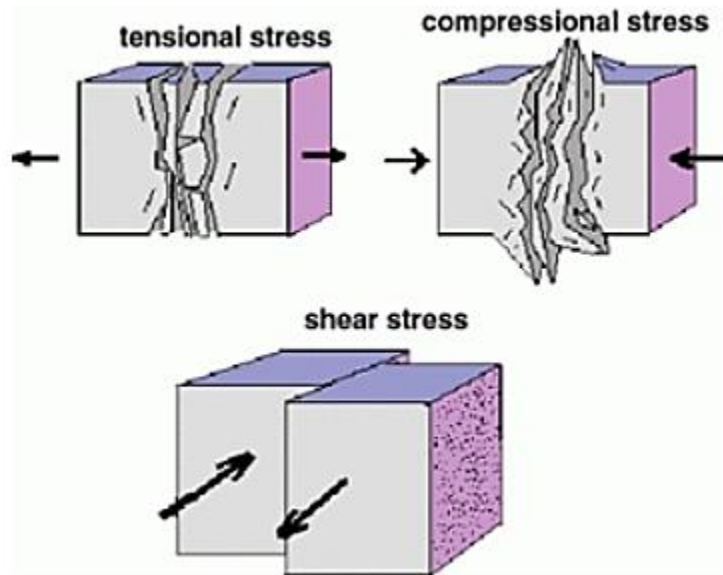


Figura 3. Tipos de esfuerzos, de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha: esfuerzo tensional, compresional y esfuerzo cortante. Tomado de Johnson, C., 2017

3.1.2 Deformación

Cuando las rocas se someten a esfuerzos, la deformación resultante puede ser elástica, dúctil o frágil. Este cambio se denomina generalmente deformación. La deformación elástica es una deformación que es reversible después de que se libera el esfuerzo. Por ejemplo, cuando estira una banda elástica, vuelve elásticamente a su forma original después de soltarla. La deformación dúctil sucede cuando se aplica suficiente esfuerzo a un material para que los cambios en su forma sean permanentes y el material ya no pueda volver a su forma original. Por ejemplo, si se dobla demasiado una barra de metal, puede perder su forma permanentemente. El punto en el que se supera la deformación elástica y la deformación se vuelve permanente se denomina límite de elasticidad.

En la Figura 4, el límite elástico es donde la línea pasa de la deformación elástica a la deformación dúctil (el final de la línea discontinua). La deformación frágil es otro punto crítico de no retorno cuando la integridad de la roca falla y la roca se fractura bajo un esfuerzo creciente. En esta figura se muestra la gráfica de esfuerzos contra deformaciones de diferentes materiales y se observa cómo se deforman de manera diferente cuando se les aplican esfuerzos. El material A tiene una deformación relativamente pequeña cuando se somete a grandes esfuerzos, antes de sufrir una deformación plástica y, finalmente, una falla por fragilidad. El material B solo se deforma elásticamente antes de la falla por fragilidad. El material C sufre una deformación plástica significativa antes de finalmente fallar por fragilidad.

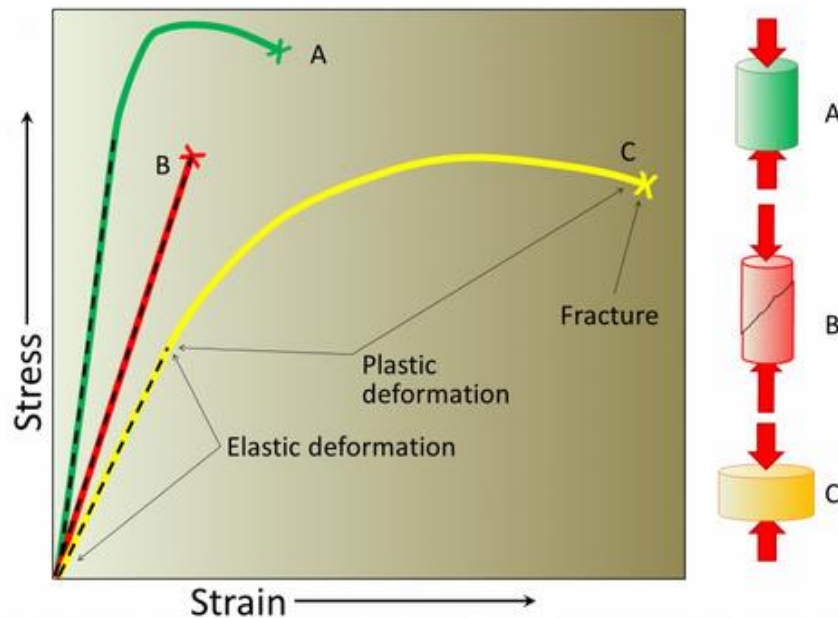


Figura 4. Gráfica de esfuerzos contra deformaciones de distintos materiales. Tomado de Johnson, C., 2017

Bajo condiciones de laboratorio, el tipo de deformación que sufre un material como se muestra en la Figura 4, depende de diversos factores tales como la velocidad de deformación, la resistencia de la roca, la temperatura, la intensidad del esfuerzo, la presión de poro, el tiempo y la presión de confinamiento. La presión de los poros se ejerce sobre la roca por fluidos en los espacios abiertos o poros incrustados dentro de la roca o sedimento.

La velocidad de deformación mide la rapidez con la que se deforma el material. Por ejemplo, aplicar esfuerzo lentamente hace que sea más fácil doblar una pieza de madera sin romperla. La resistencia de la roca mide la facilidad con la que una roca se deforma bajo esfuerzo. El esquisto tiene baja resistencia y el granito tiene alta resistencia. Eliminar el calor o disminuir la temperatura hace que los materiales sean más rígidos y susceptibles a la

deformación frágil. Por otro lado, calentar los materiales los hace más dúctiles y menos quebradizos, es por ello que, por ejemplo, el vidrio calentado se puede doblar y estirar.

3.2 Sistema Global de Navegación por Satélite GNSS

Las siglas en inglés GNSS hacen referencia a una red de satélites que proporcionan señales desde el espacio que transmiten datos de posicionamiento y tiempo a los receptores GNSS. Luego, los receptores usan estos datos para determinar la ubicación.

Por definición, GNSS proporciona cobertura global. Los ejemplos de GNSS incluyen el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) NAVSTAR de EE. UU., el Sistema Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya de Rusia (GLONASS) y el Sistema de Navegación por Satélite BeiDou de China.

El rendimiento del GNSS se evalúa utilizando cuatro criterios:

1. **Precisión:** la diferencia entre la posición, la velocidad o el tiempo medidos y reales de un receptor;
2. **Integridad:** la capacidad de un sistema para proporcionar un umbral de confianza y, en caso de anomalía en los datos de posicionamiento, una alarma;
3. **Continuidad:** la capacidad de un sistema para funcionar sin interrupción;
4. **Disponibilidad:** el porcentaje de tiempo que una señal cumple con los criterios de precisión, integridad y continuidad anteriores.

Este rendimiento puede mejorarse mediante sistemas regionales de aumento basados en satélites (SBAS), como el Servicio europeo de superposición de navegación geostacionaria (EGNOS). EGNOS mejora la precisión y la fiabilidad de la información del GPS corrigiendo los errores de medición de la señal y proporcionando información sobre la integridad de sus señales.

3.3 Global Positioning System GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS; por sus siglas en inglés) es una herramienta que brinda a los usuarios servicios de posicionamiento, navegación y sincronización. Este sistema consta de tres segmentos: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento de usuario. La Fuerza Espacial de EE. UU. desarrolla, mantiene y opera los segmentos de espacio y control. A continuación se describe cada uno de los segmentos que conforman un sistema GPS:

3.3.1 Segmento espacial

El segmento espacial consiste en una red de satélites que transmiten señales de radio a los usuarios. EE. UU., ha estado operando 31 satélites GPS activos durante más de una década, de los cuales 24 satélites se encuentran en funcionamiento el 95% del tiempo.

Los satélites GPS circulan en órbita terrestre media a una altitud de aproximadamente de 20200 km. Cada satélite gira alrededor de la Tierra dos veces al día.

Los satélites de la constelación GPS están dispuestos en seis planos orbitales equidistantes que rodean la Tierra. Cada plano contiene cuatro espacios ocupados por satélites de referencia. Esta disposición de 24 espacios garantiza que los usuarios puedan ver al menos cuatro satélites desde prácticamente cualquier punto del planeta (Figura 5).

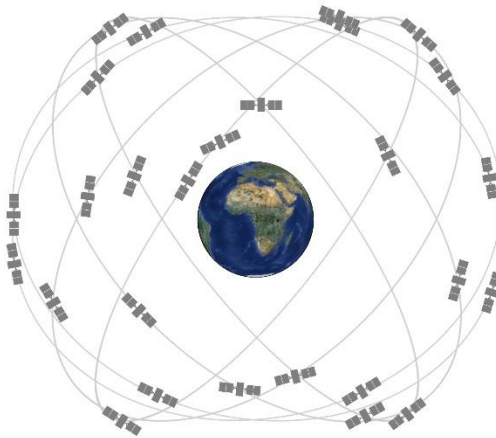


Figura 5. Red de 24 satélites GPS. Tomado de U.S. National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing. (s.f.).

Normalmente se encuentran circulando más de 24 satélites GPS para mantener la cobertura, cada vez que los satélites de referencia reciben servicio o son dados de baja. Aunque los satélites adicionales pueden aumentar el rendimiento del GPS, estos, no se consideran parte de la red principal.

3.3.2 Segmento de control

El segmento de control GPS es conformado por una red global de instalaciones terrestres que rastrean los satélites GPS, monitorean sus transmisiones, realizan análisis y envían comandos y datos a la constelación.

El Segmento de Control Operacional por sus siglas en inglés OCS, se conforma por tres elementos: estaciones de monitoreo, estaciones de control principal y antenas en tierra. En seguida se describen las funciones de cada uno de estos elementos.

Estaciones de Monitoreo

Las estaciones de monitoreo se encargan del seguimiento de satélites GPS a medida que pasan por encima. Cada una de las estaciones de monitoreo verifica la altitud exacta, la posición, la velocidad y el estado general de los satélites en órbita. El segmento de control utiliza las mediciones recopiladas por las estaciones de monitoreo para predecir el comportamiento de la órbita y el reloj de cada satélite. Los datos de predicción se enlazan hacia arriba, o se transmiten, a los satélites para su transmisión a los usuarios. El segmento de control también asegura que las órbitas y los relojes de los satélites GPS permanezcan dentro de los límites aceptables. Una estación puede rastrear hasta 11 satélites a la vez. Esta evaluación se realiza dos veces al día, por cada estación, a medida que los satélites completan su viaje alrededor de la tierra. Las variaciones, como las causadas por la gravedad de la luna, el sol y la presión de la radiación solar, se transmiten a la estación de control principal.

Estación de control principal

La estación de control principal, ubicada en la Base de la Fuerza Aérea Schriever en Colorado Springs, Colorado, es responsable de supervisar las transmisiones por satélite y la integridad del sistema para garantizar el estado y la precisión de la constelación. Proporciona comando y control de la constelación GPS, utiliza datos de la estación de monitoreo global para calcular las ubicaciones precisas de los satélites, y genera mensajes de navegación para subir a los satélites. Realiza también el mantenimiento de satélites y resolución de anomalías, incluido el reposicionamiento de satélites para mantener una constelación óptima. Esta estación cuenta con una estación de control principal alternativa totalmente operativa.

Antenas de tierra

Consta de cuatro antenas terrestres que monitorean y rastrean los satélites de horizonte a horizonte. También transmiten información de corrección a satélites individuales, envían comandos, cargas de datos de navegación y cargas de programas de procesador a los satélites, y recopilan la telemetría. Consta de 4 antenas terrestres GPS dedicadas más 7 estaciones de seguimiento remotas de la Red de Control de Satélites de la Fuerza Aérea.

En total se tiene una estación de control maestra, una estación de control maestra alternativa, 11 antenas de comando y control y 16 sitios de monitoreo. Las ubicaciones de estas instalaciones se muestran en el mapa de la Figura 6.

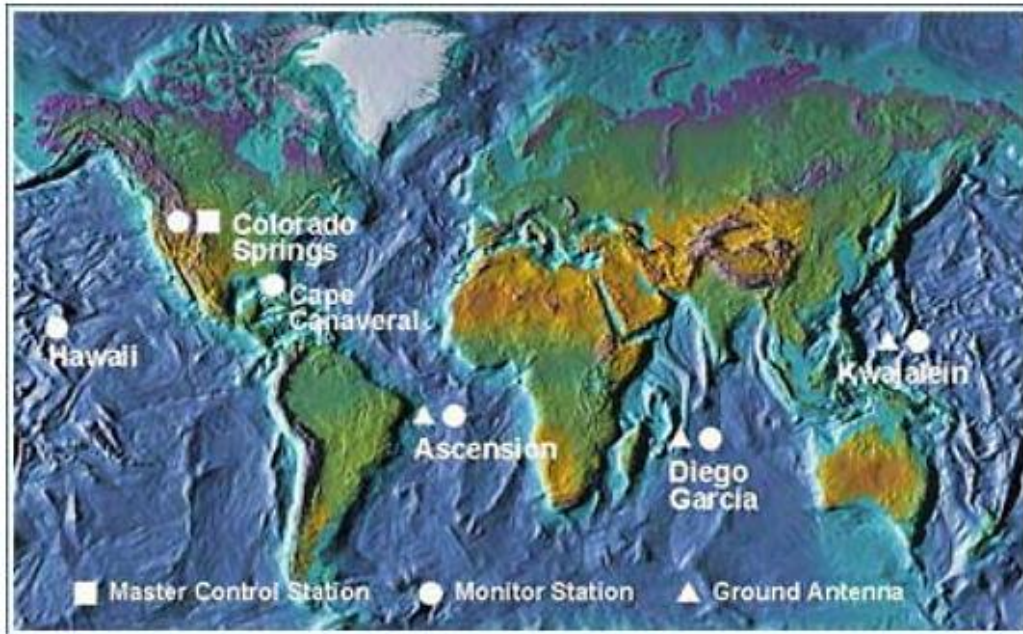


Figura 6. Ubicación de la estación de control, estaciones de monitoreo y antenas en Tierra. Tomado de Federal Aviation Administration, U.S. (s.f.).

3.4. Ecuaciones de Boussinesq

La determinación del estado de esfuerzo en un semiespacio elástico isotrópico que está sujeto a una fuerza concentrada normal a una superficie libre de tracción fue considerada por primera vez por Boussinesq. La solución a este problema se puede abordar por varios métodos. El primer enfoque consiste en reducir el problema a un problema de valores en la frontera en la teoría del potencial. Cuando la superficie del semiespacio se somete únicamente a tracciones normales, el problema de la elasticidad se reduce a encontrar una sola función armónica con todas las características de una sola capa distribuida sobre la región plana con una intensidad proporcional a las tracciones normales aplicadas. La solución al problema de la fuerza concentrada se recupera como un caso especial de la carga normal general.

El segundo enfoque para la solución del problema de Boussinesq comienza con la solución de Kelvin para la fuerza puntual que actúa en el interior de un espacio infinito y utiliza una distribución de combinaciones de dipolos, que son equivalentes a una distribución de centros de compresión a lo largo de un eje, eliminar las tracciones cortantes que se producen en el plano normal a la línea de acción de la fuerza de Kelvin, recuperando así la solución de Boussinesq.

Un tercer enfoque implica la aplicación de técnicas de transformación integral a la solución de una ecuación diferencial parcial gobernante (por ejemplo, para la función de deformación de Love) que luego se puede usar para satisfacer explícitamente las

condiciones de frontera de tracción aplicables directamente al problema de Boussinesq. Sneddon (1951) da detalles de este procedimiento. Si bien estos enfoques representan procedimientos clásicos para obtener una solución al problema de Boussinesq; a continuación se presenta otro enfoque para obtener la solución al problema de Boussinesq desarrollado en Selvadurai, A. (1999).

3.4.1. Ecuaciones fundamentales

Consideramos problemas que son simétricos respecto al eje $\theta = 0$ de un sistema de coordenadas polares esféricas (R, ϑ, θ) con $R(0, \infty)$, $\vartheta(0, 2\pi)$ y $\theta(0, \pi)$. La solución de tales problemas axisimétricos puede abordarse a través del potencial de deformación de Lamé $\varphi(R, \theta)$ que satisface

$$\nabla^2 \varphi(R, \theta) = 0$$

Ecuación 1

O una función de deformación de Love $\Phi(R, \theta)$ la cual satisface

$$\nabla^2 \nabla^2 \Phi(R, \theta) = 0$$

Ecuación 2

Donde ∇^2 es el operador de Laplace en coordenadas polares esféricas

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial}{\partial R} + \frac{\cot \theta}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$$

Ecuación 3

Los componentes de desplazamiento y esfuerzo derivados de $\varphi(R, \theta)$ toman las formas

$$2Gu_R = \frac{\partial \varphi}{\partial R}, \quad 2Gu_\theta = \frac{1}{R} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta}$$

Ecuación 4

y

$$\sigma_{RR} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial R^2}, \quad \sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{R} \frac{\partial \varphi}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2}$$

$$\sigma_{\vartheta\vartheta} = \frac{1}{R} \frac{\partial \varphi}{\partial R} + \frac{\cot \theta}{R^2} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta}, \quad \sigma_{R\theta} = \frac{\partial^2}{\partial R \partial \theta} \left(\frac{\varphi}{R} \right),$$

Ecuación 5

respectivamente. Los componentes de desplazamiento y esfuerzo derivados de $\Phi(R, \theta)$ están dados por

$$2Gu_R = \cos\theta \left[2(1-\nu)\nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial R^2} \right] \Phi + \frac{\sin\theta}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial}{\partial R} - \frac{1}{R} \right) \Phi$$

$$2Gu_\theta = \sin\theta \left[-2(1-\nu)\nabla^2 + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right] \Phi + \frac{\cos\theta}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(-\frac{\partial}{\partial R} + \frac{1}{R} \right) \Phi$$

Ecuación 6

$$\sigma_{RR} = \cos\theta \frac{\partial}{\partial R} \left[(2-\nu)\nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial R^2} \right] \Phi + \frac{\sin\theta}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[-\nu\nabla^2 + \frac{\partial^2}{\partial R^2} - \frac{2}{R} \frac{\partial}{\partial R} + \frac{2}{R^2} \right]$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \cos\theta \frac{\partial}{\partial R} \left[\nu\nabla^2 - \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} - \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right] \Phi$$

$$+ \frac{\sin\theta}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[-(2-\nu)\nabla^2 + \frac{3}{R} \frac{\partial}{\partial R} - \frac{2}{R^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right] \Phi$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \left\{ \cos\theta \frac{\partial}{\partial R} - \frac{\sin\theta}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \right\} \left[-(1-\nu)\nabla^2 + \frac{\partial^2}{\partial R^2} \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \right] \Phi$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\cos\theta}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[(1-\nu)\nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial}{\partial R} - \frac{2}{R} \right] \Phi$$

$$+ \sin\theta \frac{\partial}{\partial R} \left[-(1-\nu)\nabla^2 + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right]$$

Ecuación 7

En la ecuación (4) a (7), G y ν son, el módulo de corte y la relación de Poisson, respectivamente. Además, notamos que $R^2\varphi(R, \theta)$ es biarmónico.

3.4.2. Problema de Boussinesq

Comenzamos con el problema de Kelvin para la fuerza puntual de magnitud P_K que actúa en el interior de un espacio infinito elástico isotrópico. Una observación básica es que dado que P_K es una fuerza puntual y dado que el medio tiene una extensión infinita, no existe una escala de longitud natural asociada con el problema de Kelvin. Sin embargo, el uso de una función de potencial de Lamé o una función de deformación de Love debería producir, a través de diferenciaciones apropiadas con respecto a R , expresiones para esfuerzos que son del orden de $1/R^2$ para generar las dimensiones correctas para el esfuerzo (es decir, diferenciación de $\varphi(R, \theta)$ dos veces con respecto a R y la diferenciación de $\Phi(R, \theta)$ tres

veces con respecto a R). Además, la elección de una solución exterior debe ser tal que las tensiones sean finitas dentro de la región (excluyendo el origen) y deben reducirse a cero cuando $R \rightarrow \infty$. La componente axial de las tracciones que actúan sobre cualquier superficie cerrada que encierra el punto de aplicación de la fuerza de Kelvin (o lo incluye en el límite de la superficie) debe ser idénticamente igual a P_K . Este requisito de invariancia también apunta al hecho de que las dimensiones de las tensiones deben ser del orden $1/R^2$. La solución exterior para $\varphi(R, \theta)$ es C/R , donde C es una constante. De (5) está claro que la solución Lamé 'exterior' no producirá el orden requerido $1/R^2$ para la distribución de tensiones. La función de esfuerzo de Love derivada de esta solución exterior.

$$\Phi(R, \theta) = CR \quad \text{Ecuación 8}$$

proporcionará el orden correcto en R para los componentes de esfuerzo. Evitando detalles, los desplazamientos y tensiones aplicables a la solución de Kelvin toman las formas

$$2Gu_R = \frac{4C(1-\nu)\cos\theta}{R}, \quad 2Gu_\theta = -\frac{C(3-4\nu)\sen\theta}{R} \quad \text{Ecuación 9}$$

y

$$\sigma_{RR} = \frac{2C(2-\nu)\cos\theta}{R^2}, \quad \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta} = \frac{C(1-2\nu)\cos\theta}{R^2}, \quad \sigma_{R\theta} = \frac{C(1-2\nu)}{R^2}\sen\theta \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde

$$C = \frac{P_K}{8\pi}(1-\nu), \quad \text{Ecuación 11}$$

Si consideramos la región del semiespacio $z \geq 0$ asociada a la solución del problema de Kelvin, es claro que el plano $z = 0$ está sometido a las tensiones

$$\sigma_{\theta\theta}\left(R, \frac{\pi}{2}\right) = 0, \quad \sigma_{R\theta}\left(R, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{C(1-2\nu)\sen\theta}{R^2} \quad \text{Ecuación 12}$$

12

Considerando el problema de Boussinesq donde la superficie del semiespacio está sujeta a una fuerza normal concentrada P_B en $R = 0$. Aquí nuevamente, no hay un parámetro de longitud naturalmente asociado con el problema y las soluciones se derivan del potencial de Lamé $\varphi(R, \theta)$ o la función de deformación de Love $\Phi(R, \theta)$ debe dar la forma correcta del orden de $1/R^2$ en las derivadas apropiadas para proporcionar una medida dimensionalmente consistente de las tensiones. Ya se ha empleado la solución exterior para $\varphi(R, \theta)$ para generar la función de deformación de Love para el problema de Kelvin. En

consecuencia, no se puede esperar que una solución biarmónica proporcione una solución con el orden correcto $1/R^2$ para la variación del esfuerzo. Por lo tanto, buscamos una solución del potencial de deformación de Lamé que debería ser de una forma tal que cuando se diferencia dos veces con respecto a R , la expresión resultante debería ser del orden de $1/R^2$. Por lo tanto, la solución requerida debe ser de la forma

$$\varphi(R, \theta) = A \ln [Rf(\theta)], \quad \text{Ecuación 13}$$

donde A es una constante $f(\theta)$ es una función arbitraria. Sustituyendo (13) en (1) obtenemos

$$\frac{d}{d\theta} \left\{ \frac{\text{sen}\theta}{f} \frac{df}{d\theta} \right\} + \text{sen}\theta = 0 \quad \text{Ecuación 14}$$

La solución de (14), obtenida mediante integraciones sucesivas tiene la siguiente forma:

$$f(\theta) = \exp \left\{ \int_0^\theta \left(\frac{\cos\phi - 1}{\text{sen}\phi} \right) d\phi \right\} = (1 + \cos\theta), \quad \text{Ecuación 15}$$

El potencial de deformación de Lamé

$$\varphi(R, \theta) = A \ln (R + R \cos \theta) \quad \text{Ecuación 16}$$

resultan los componentes de esfuerzo

$$\sigma_{\theta\theta}(R, \theta) = \frac{A \cos\theta}{R^2(1+\cos\theta)} \quad \sigma_{R\theta}(R, \theta) = \frac{A \text{sen}\theta}{R^2(1+\cos\theta)} \quad \text{Ecuación 17}$$

El resultado (17) ahora se puede combinar con las tensiones derivadas del problema de Kelvin, (10), para satisfacer la condición límite de tracción de cortante cero requerida para la solución de Boussinesq. Esto resulta:

$$A = -C(1 - 2\nu),$$

Ecuación 18

y C puede determinarse evaluando la resultante de las tracciones axiales que actúan sobre una superficie hemisférica, de radio arbitrario a , centrada en el origen, es decir,

$$P_B + 2\pi \int_0^{\pi/2} [\sigma_{RR}^* \cos\theta - \sigma_{R\theta}^* \text{sen}\theta] a^2 \text{sen}\theta d\theta = 0, \quad \text{Ecuación 19}$$

donde σ_{RR}^* y $\sigma_{R\theta}^*$ se refieren al estado de esfuerzo obtenido al combinar (10) y (17). Esto da

$$C = \frac{P_B}{2\pi}, \quad \text{Ecuación 20}$$

Los componentes de desplazamiento y esfuerzo toman formas

$$2Gu_R = \frac{P_B}{2\pi R} [4(1 - \nu)\cos\theta - (1 - 2\nu)],$$

$$2Gu_R = \frac{P_B \sin\theta}{2\pi R} \left[-(3 - 4\nu) + \frac{(1-2\nu)}{(1+\cos\theta)} \right], \quad \text{Ecuación 21}$$

y

$$\sigma_{RR} = \frac{P_B}{2\pi R} [1 - 2\nu - 2(2 - \nu)\cos\theta],$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{P_B(1 - 2\nu)\cos^2\theta}{2\pi R^2(1 + \cos\theta)}, \quad \sigma_{\theta\theta} = \frac{P_B(1 - 2\nu)}{2\pi R^2} \left(\frac{\cos\theta - \sin^2\theta}{1 + \cos\theta} \right),$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{P_B(1 - 2\nu)}{2\pi R^2} \left(\frac{\sin\theta \cos\theta}{1 + \cos\theta} \right)$$

Ecuación 22

Cuando $\nu = \frac{1}{2}$, tanto la solución de Boussinesq para la carga normal de la superficie de un semiespacio como la solución de Kelvin para la carga interior de un espacio infinito por una fuerza concentrada se reducen al mismo resultado, donde el estado de esfuerzo solo es radial.

Capítulo 4. Área de estudio

El área de estudio en la que se centra este trabajo es una cuenca, la cual se puede definir como un espacio geográfico cuyos aportes hídricos naturales son alimentados exclusivamente por la precipitación y donde los excedentes de agua convergen en un punto espacial único. Las características físicas de una cuenca como lo son la hidrología, topografía y geología nos serán de utilidad en la comprensión de los fenómenos de desplazamientos observados en la zona.

4.1 Ubicación

La ubicación del área de estudio se encuentra dentro del municipio de Iguala al norte de la ciudad de Chilpancingo, Guerrero, y está ubicado entre los paralelos 18°13" y 18°27" de

latitud Norte y los meridianos 99°29" y 99°42" de longitud Oeste (Figura 7). La ciudad se ubica a 731 msnm y se presentan tres tipos de relieve: el que constituye las zonas accidentadas (40 por ciento del territorio municipal localizadas principalmente en Coacoyula de Álvarez), donde destacan los cerros Tuxpan con 1,695 metros; Conejo con 1,237 y Grande o Pívilas con 1,420 m. El 30% lo componen zonas semiplanas localizadas al oriente y sur del municipio, sobre las localidades de Ahuchupan, Motlapa, Ceja Blanca y Planta de Zapotal. Las zonas planas constituyen el 30% restante y se localizan en el centro, norte y oriente.



Figura 7. Mapa de ubicación del área de estudio. Se señala con una flecha color rojo el municipio donde se localiza.

4.4 Cuenca Laguna Tuxpan

La cuenca Laguna Tuxpan se compone por las subcuencas del lago de Tuxpan y río Tomatal, pertenecientes a la Región Hidrológica número 18 en el país y se localizadas en el municipio de Iguala, Estado de Guerrero al sur de México, (INEGI, 1998). Las subcuencas se encuentran entre las coordenadas 18° 24' 29.13" y 18° 17' 13.33" N y -99° 31' 59.17" y -99° 26' 59.32" W. Comprende una superficie total de 69.13 km². El lago es el colector principal y un cuerpo natural del lado de la subcuenca de Tuxpan y rectificado por lado de la

subcuenca del río Tomatal de aguas interiores. Su perímetro es de aproximadamente 8.5 km, con una longitud de 2.8 km. Y un ancho de 1.9 km.



Figura 8. Mapa de la región hidrológica 18 Río Balsas y las subcuencas que lo conforman.

Las subcuencas se dividen en seis y tres microcuencas, dando un total de nueve la cuales se pueden apreciar en la Figura 8. Las subcuencas tienen varios afluentes, entre los más importantes son: río Tomatal, arroyo Tepantlán y arroyo Platanillo. A continuación, se muestran la distribución de superficie en cada subcuenca que conforma la cuenca Laguna Tuxpan, en kilómetros cuadrado y el porcentaje correspondiente a cada subcuenca (Tabla 1).

Tabla 1. Distribución de área dentro de la cuenca Laguna Tuxpan

	Superficie	
	Km ²	%
Subcuenca Laguna de Tuxpan	40.3645	58.38
Subcuenca río tomatal	25.1265	36.34
Lago (Laguna de Tuxpan)	3.6456	5.27
Total	69.1366	100

El lago (Laguna de Tuxpan) es un lago de origen tectónico formado en una depresión de la corteza terrestre. Este tipo de lagos yacen en una subsidencia. Muchas de estas depresiones

se convierten en depósitos de agua debido a la baja porosidad de los sedimentos (Wetzel 2001). En muchos lagos los aportes de agua subterránea pueden ser muy importantes y llegan a representar la mitad del aporte hidrológico anual con grandes cargas de fósforo y nitrógeno, como parece suceder en el lago “Laguna de Tuxpan”. Según el reporte “Reservas de la Biósfera y otras Áreas Protegidas de México” (1995), el lago está catalogado como Presa Laguna de Tuxpan, con fecha de Decreto del 3 de agosto de 1949, con una superficie de 10,000.00 hectáreas y con categoría ZPF (Zona Protectora Forestal).

Las subcuencas de El Tomatal y de la Laguna de Tuxpan, presentan pocos afluentes en su recorrido hasta el lago. Solamente el río Tomatal se incorpora al cauce con escurrimiento permanente

4.2 Geología y Edafología

Las rocas de las subcuencas son principalmente caliza-dolomía, aluvión, conglomerado polimíctico-arenisca, y lutita-arenisca de los Periodos Cretácico Inferior y Superior, Terciario Paleógeno y Cuaternario, con rocas que varían desde el Cretácico Inferior al Reciente. Subyacen concordantemente a calizas de la formación Morelos (KaceCz-Do) del Albiano-Cenomaniano. Sobreyaciendo a esta unidad, también concordantemente, se depositó una secuencia terrígeno- calcárea denominada Mezcala (KtcLu-Ar), con un afloramiento discordante y una secuencia sedimentaria continental, con intercalaciones de rocas volcánicas de la formación Balsas (TeCgp-Ar) que se les considera de una edad correspondiente al Eoceno ().

Los suelos se originaron por cenizas volcánicas o rocas calizas, calcáreas y sedimentarias y fueron modificados por la acción de los factores climáticos y la vegetación. En la actualidad las subcuencas presentan un amplio mosaico de tipos edafológicos. Entre los más importantes se puede mencionar: Luvisol, Regosol, Cambisol, Vertisol, Castañozem, Feozem, Rendzina y Litosol

Geología de la Cuenca Tuxpan Iguala, Guerrero

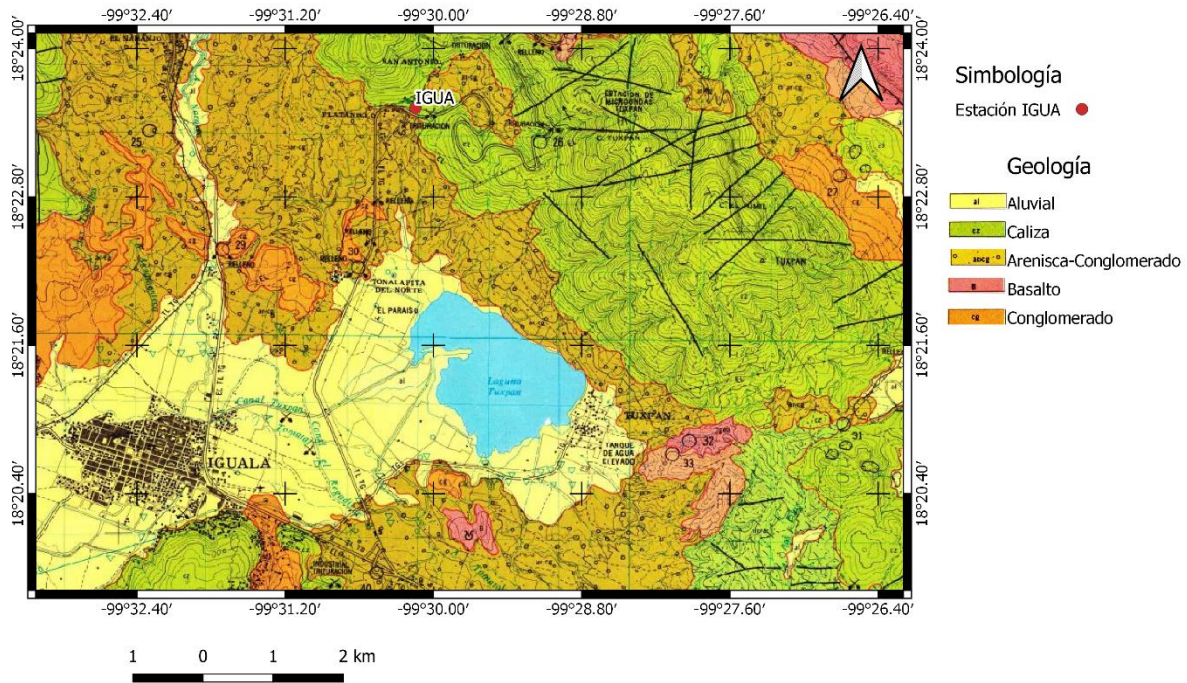


Figura 9. Mapa geológico del área de estudio

4.3 Topografía e hidrología

La fisiografía del área muestra que los cerros ubicados en las áreas noreste, norte y suroeste de las subcuencas superan los 1,731 msnm; y los demás varían entre 1,000 y 1600 msnm (Figura 10). Las subcuencas están moderadamente rodeadas de cerros de caliza dolomía y suelo con pendiente de ligera a moderadamente pronunciada. La hidrología está constituida de una serie de arroyos poco evidentes y el río Tomatal, que conducen el agua de lluvia al lago Tuxpan. Los procesos hidrológicos tienen su sustento en las infiltraciones a través de los manantiales subterráneos y subacuáticos que emergen por doquier.

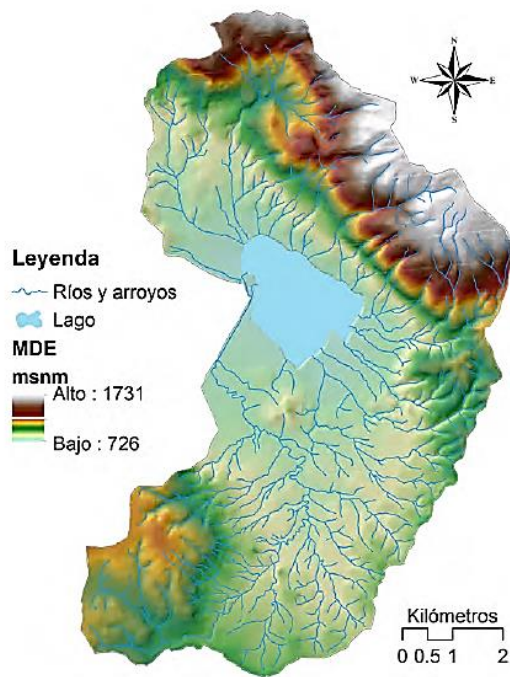


Figura 10. Modelo digital de elevación del suelo de las subcuencas. Mapa hidrológico de la Laguna de Tuxpan y río Tomatal (Tomado de IMTA2013).

4.4. Clima

El clima anual de los últimos 29 años, específicamente la temperatura media anual y la precipitación total anual, misma que representan la variación interanual en la estación climatológica Tuxpan (12222), se muestran en la Figura 11. La temperatura máxima de 28.07°C se presenta en el mes de mayo, y el mínimo de 22.64°C en diciembre. En el caso de la precipitación máxima ocurre en el mes de agosto con 207.76 mm y la mínima en diciembre. Aplicando los criterios de la clasificación climática de Köppen-García (1973), el análisis de la precipitación y la temperatura de 1981 a 2009 indicó una precipitación total anual de 974.9 mm, una temperatura media anual de 21.29 °C; una precipitación del mes más lluvioso (septiembre) de 207.50 mm, y del mes más seco (febrero) de 1.60 mm; una temperatura del mes más caliente (junio), de 23.5 °C, y la del mes más frío de 18.7 °C (diciembre); una oscilación anual de la temperatura media mensual de 4.8 (°C) que corresponde a un clima tipo A(C)w1(w)i, o sea tropical lluvioso (Gonzales, 2016).

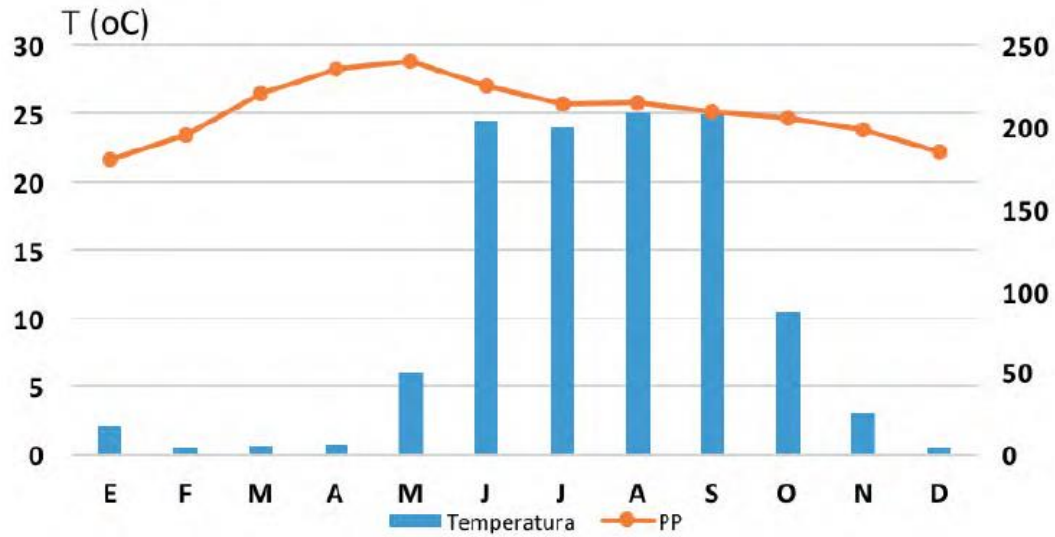


Figura 11. Comportamiento de la precipitación y la temperatura entre 1981 y 2009 en la estación meteorológica Laguna de Tuxpan, Gro. (Modificada de IMTA 2013).

La precipitación media anual para el área de las subcuencas indica que el lago tiene una precipitación de 990 mm, con los mayores valores en las zonas altas de la subcuenca, y con valores de 1,100 a 1,160 mm para la zona norte del poblado de Iguala Figura 12.

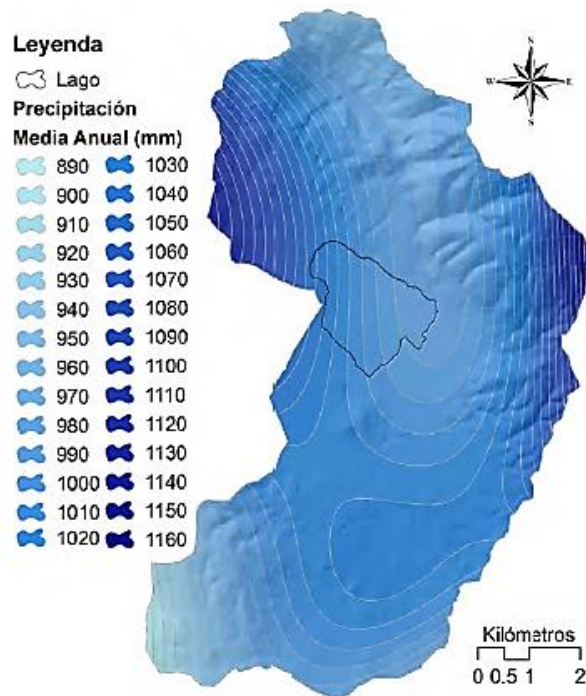


Figura 12. Precipitación media anual para las subcuencas de la laguna de Tuxpan y el río Tomatal (Modificada de IMTA 2013).

Capítulo 5. Metodología

5.1 Obtención de datos

Para esta investigación se utilizaron datos de la cantidad de lluvia diaria registrada en lugares cercanos a la estaciones de GPS seleccionadas, las cuales son estaciones ubicadas en el sur y centro de México (Tabla 2), Los datos abarcan un periodo de 2010 a 2019, la duración puede variar dependiendo de la disponibilidad de datos de lluvia o GPS que se tenían en el sitio.

5.1.1. Datos de lluvia

Los datos de lluvia utilizados en esta investigación se obtuvieron de la base de datos de información estadística climatológica, la cual es administrada por el Organismo de Cuenca y Direcciones Locales, dicha base de datos se encuentra en la página web de la Comisión Nacional de Agua por sus siglas CONAGUA. En esta base se encuentran información climatológica nacional que va de 1900 hasta la fecha, la cual implica aproximadamente 55 millones de registros diarios de lluvia en 24 horas y temperatura mínima y máxima (Figura 13) reportados por alrededor de 5,500 estaciones climatológicas.

Dichos datos son recopilados por Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) , las cuales son sistemas autónomos y automáticos formados por un conjunto de sensores de medición, dispositivos eléctricos y electrónicos en donde son distribuidos, orientados y conectados al Sistema de adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos (SAPAD) de la estación, con el objetivo de realizar la medición y registro de las variables meteorológicas que imperan en el lugar, y transmitir los datos obtenidos a la oficina central, en donde serán utilizados y almacenados a una base de datos. Los datos de lluvia usados se tomaron de la estación meteorológica más cercana a las coordenadas de la estación GPS estudiada.

```

CNA-SMN-CG-GMC-SMAA-CLIMATOLOGIA
BASE DE DATOS CLIMATOLOGICA
DATOS DISPONIBLES EN LA BASE DE DATOS A MARZO 2020;CON LA INFORMACION SUMINISTRADA POR LAS OFICINAS REGIONALES

ESTACION : 12222
NOMBRE : LAGUNA DE TUXPAN
ESTADO : GUERRERO
MUNICIPIO : IGUALA DE LA INDEPENDENCIA
SITUACION : OPERANDO
ORGANISMO : CONAGUA-DGE
CVE-OMM : Nulo
LATITUD : 018.348
LONGITUD : -099.478
ALTITUD : 767 msnm

EMISION : 06/04/2020

```

FECHA	PRECIP (MM)	EVAP (MM)	TMAX (C)	TMIN (C)
01/01/1981	0	4	30	10.5
02/01/1981	0	4.8	29.5	11
03/01/1981	0	4.1	30	11
04/01/1981	0	4.2	29.5	10.5
05/01/1981	0	5	30.5	11
06/01/1981	0	3.2	29.5	11.5
07/01/1981	0	4.1	29.5	11
08/01/1981	0	5.4	30	13.5
09/01/1981	0	4.2	31	14
10/01/1981	0	4.8	30.5	14.5
11/01/1981	0	4.8	31	14
12/01/1981	0	5	31.5	15

Figura 13. Datos mostrados en una Estación Meteorológica Autónoma. Caso de la estación meteorológica más cercana a la estación GPS IGUA

5.1.2. Señales GPS

Las señales GPS fueron proporcionadas por la Dra. Ekaterina Kazachkina (Kazachkina, E., 2022), quien las obtuvo de la base de datos del Servicio Sismológico Nacional (SSN, 2022) y utilizó el paquete GAMIT/GLOBK 10.71 para obtener las series de tiempo GPS, así como el programa Pyacs de JM Nocquet como parte del post-procesamiento para quitar los outliers y girar las series de tiempo al marco de referencia de la placa Norteamericana, obteniendo el resultado mostrado en la Figura 14. Donde se aprecian las 3 componentes de desplazamiento en la estación YAIG, componente en dirección norte, este y vertical

YAIG

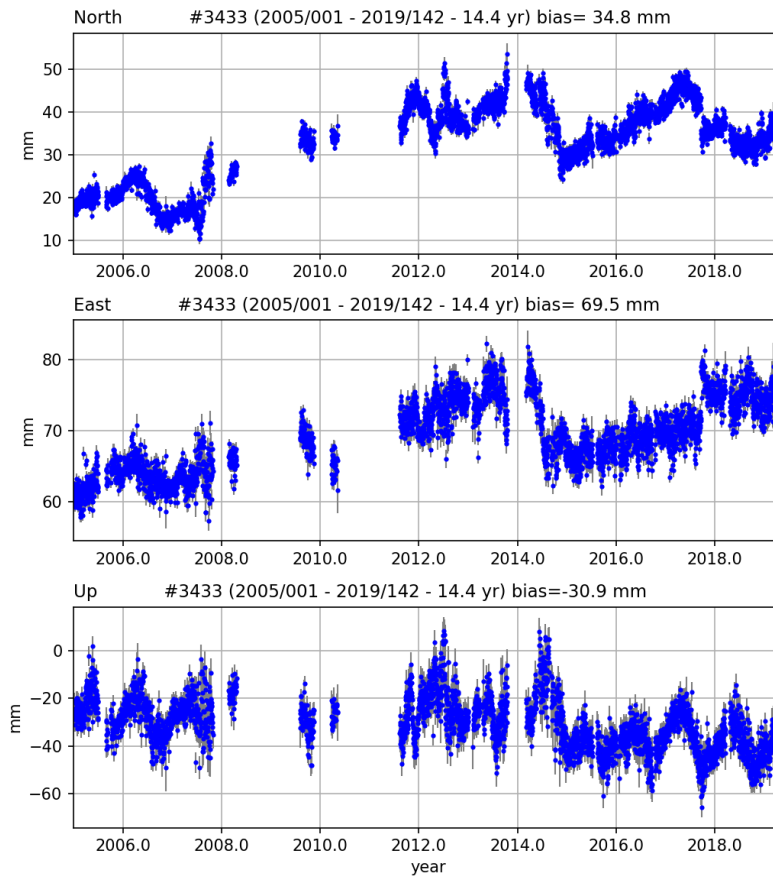


Figura 14. Estación de GPS YAIG. Gráfica de desplazamiento Norte- sur, este- oeste y vertical

5.2. Comparación de datos GPS y señales de lluvia.

Con el objetivo de realizar un análisis para conocer si existen deformaciones en el terreno provocados por la cantidad de lluvia, se comparó el movimiento vertical de una estación GPS, el cual presenta un comportamiento cíclico con el paso del tiempo como se muestra en la Figura 15. Los lugares observados son zonas donde se ubican estaciones GPS en la zona centro y sur de México. El listado de las estaciones analizadas y su respectiva ubicación se encuentra en la Tabla 2.

Una vez graficadas la señales GPS se graficaron en conjunto con los datos de lluvia mencionados en el apartado 5.1.1, los cuales corresponden a la cantidad de lluvia diaria registrada en el mismo periodo de tiempo y la zona en la que se encuentra ubicada la estación GPS. En el capítulo 6 se mostrarán los resultados obtenidos mediante esta comparación en cada estación.

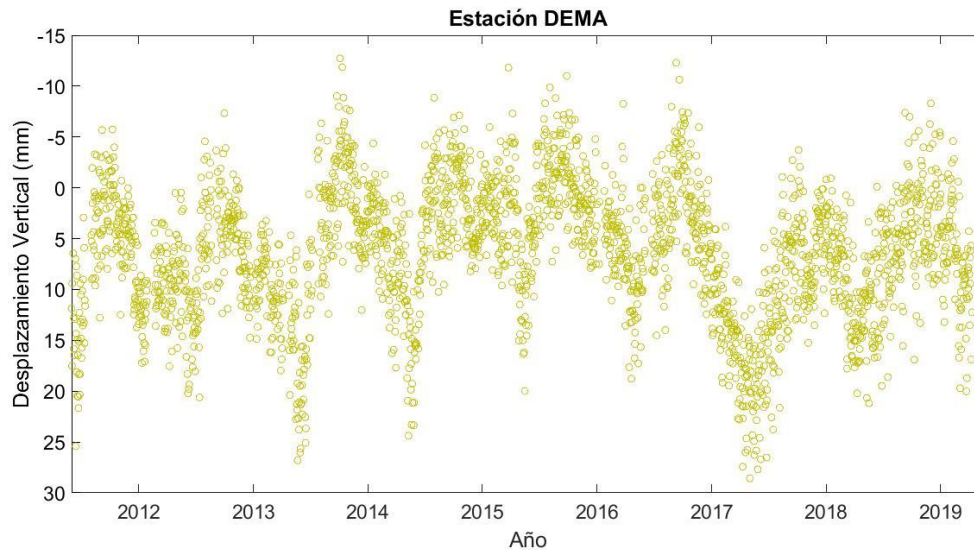


Figura 15. Gráfica de desplazamiento vertical registrado en la estación DEMA

La gráfica conjunta de los datos de lluvia y las señales GPS son una herramienta que nos permite compara ambos fenómenos y determinar si existe una relación. Para dicha comparación se utilizó un programa en MATLAB (Anexo A) proporcionado por el Dr. Allen Husker (Husker, 2022- Comm. Pers.), el cual consiste en un código que se encarga de crear una serie de tiempo con los datos de lluvia y compararlos con la señal GPS. Dicho software crea la serie de tiempo de lluvia sumando los datos de lluvia que se encuentran en mm y ajustándolos a un polinomio con el fin de quitar la tendencia de la serie de datos a cada valor, dando como resultado una serie de datos que muestren el comportamiento de la lluvia en la zona a través de los años. En el caso de los datos de GPS, se grafican la componente vertical de desplazamiento sobre la gráfica de lluvia, para visualizar en una misma figura y poder distinguir si existe una relación entre el ciclo anual de lluvia y el desplazamiento del suelo en esa estación.

Un ejemplo de las gráficas obtenidas se muestra en la Figura 16 y Figura 17 perteneciente a las estaciones DEMA e ICEP, donde la lluvia está representada por la serie de puntos en color azul y los datos GPS se representan con puntos color amarillo. En el anexo B se pueden visualizar todas la gráficas obtenidas y listadas en la Tabla 2

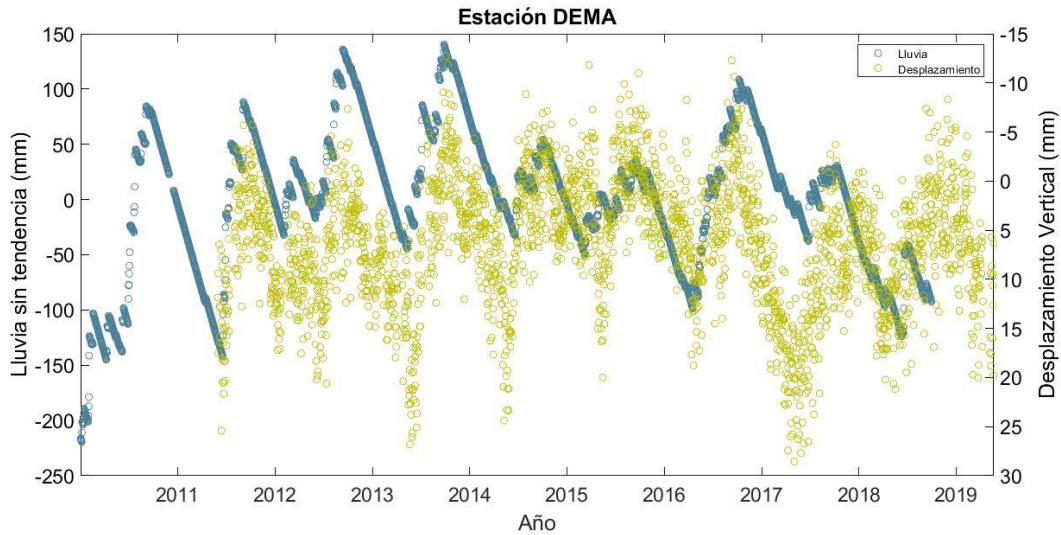


Figura 16. Gráfica de acumulación de lluvia vs tiempo y la componente vertical de desplazamiento de la estación DEMA. La serie de puntos azules se refiere a la lluvia y los puntos en color verde representan el desplazamiento.

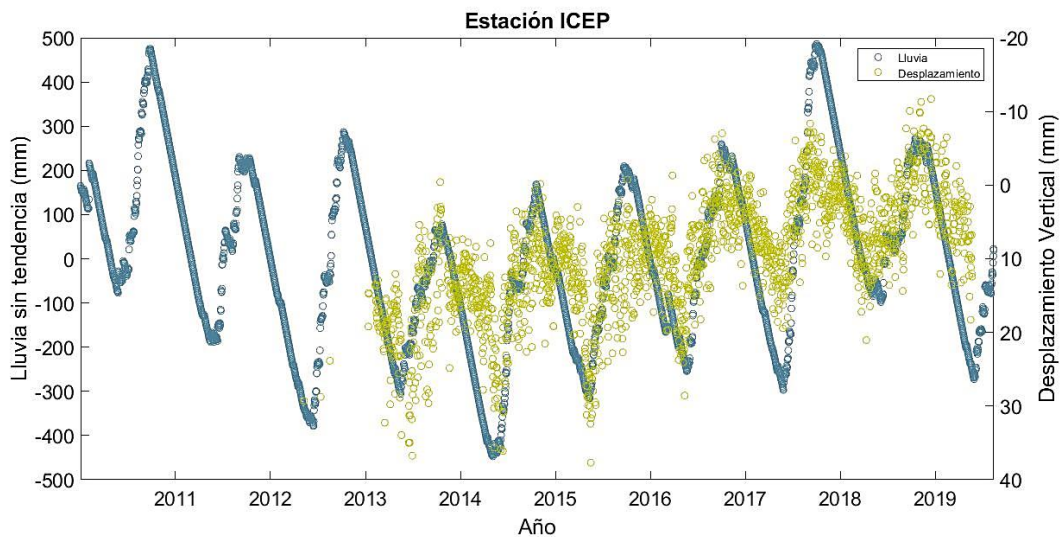


Figura 17. Gráfica de acumulación de lluvia vs tiempo y la componente vertical de desplazamiento de la estación ICEP. La serie de puntos azules se refiere a la lluvia y los puntos en color verde representan el desplazamiento.

En la mayor parte de las estaciones se logró realizar una comparación, sin embargo, existen algunos casos donde no es posible realizar una comparación entre los datos como lo es en la estación IHGO, ITLA y UNTO donde se tiene una falta de datos de desplazamiento en el periodo de estudio seleccionado y por tanto no se puede concluir si existe la relación entre los datos.

Estaciones GPS observadas				
No.	Estación	Región	Latitud	Long
1	COMI	Sur	16.2819	-92.1368
2	SABI	Sur	18.967022°	-91.186578°
3	THIG	Sur	14.882387°	-92.295769°
4	UVER	Sur	19.1655	-96.1144
5	UXAL	Sur	19.516400°	-96.924800°
6	VIL2	Sur	17.990410°	-92.931096°
7	PEIG	Oaxaca	15.99769	-97.14755
8	MARO	Oaxaca	17.090900°	-94.884200°
9	OAX2	Oaxaca	17.078339°	-96.716738°
10	OAXA	Oaxaca	17.072607°	-96.733270°
11	TNAT	Oaxaca	18.1302	-98.0411
12	TNNP	Oaxaca	16.1205	-97.1420
13	TNNX	Oaxaca	17.4076	-97.2239
14	OXTH	Oaxaca	16.286300°	-95.240800°
15	TOIG	Oaxaca	15.7538	-96.1296
16	HUAM	Oaxaca	18.0957	-97.0646
17	HUAT	Oaxaca	15.7692	-96.1084
18	DEMA	Cd. México	20.300400°	-99.035364°
19	ICEP	Cd. México	19.0330	-98.1876
20	IGUA	Cd. México	18.392004°	-99.502441°
21	IHGO	Cd. México	20.1234	-98.7441
22	ITLA	Cd. México	19.3091	-98.2156
23	SSNX	Cd. México	19.3272	-99.1768
24	TNAL	Cd. México	19.1187	-98.6552
25	TNGF	Cd. México	19.3269	-99.1761
26	TOL2	Cd. México	19.293235°	-99.643470°
27	UTON	Cd. México	19.033500°	-98.316200°
28	CEFA	Querétaro	20.5230	-100.8110
29	CECM	Querétaro	20.5320	-100.8070
30	UNTO	Cd. México	19.3196	-99.5976
31	ACYA	Guerrero	16.8380	-99.9029
32	ARIG	Guerrero	18.2805	-100.3437
33	AYUT	Guerrero	16.9878	-99.1453
34	CAYA	Guerrero	17.0485	-100.2672
35	CN24	Guerrero	19.5756	-88.0539
36	COYU	Guerrero	17.0085	-100.0811
37	LAZA	Guerrero	17.5193	-99.4866

38	PINO	Guerrero	16.3928	-98.1273
39	TLIG	Guerrero	17.5620	-98.5660
40	TNIF	Guerrero	18.2710	-101.8950
41	YAIG	Guerrero	18.8623	-99.0672
42	ZIHP	Guerrero	17.6071	-101.4654
43	ZIHU	Guerrero	17.6069	-101.4650

Tabla 2. Estaciones utilizadas en este análisis

En el mapa de la Figura 18 se muestran todas las estaciones analizadas en este trabajo (Tabla 2). En color rojo los puntos que representan las estaciones que muestran comportamientos similares entre la lluvia y el desplazamiento vertical como el presentado en la Figura 16 y en color azul se representan las estaciones en las que no se puede afirmar que exista una relación. El conjunto de puntos en color rojo y azul son las mismas estaciones GPS listadas en la Tabla 3.



Figura 18. Mapa que muestra las estaciones GPS afectadas

En la mayor parte de las estaciones analizadas, se encontró que el desplazamiento vertical parece seguir el comportamiento de los ciclos de lluvia anual registrados en la región,

aunque en algunas estaciones el efecto es bastante claro, una de las estaciones que mejor ejemplifica este efecto es la estación IGUA (Figura 19), ubicada en Iguala Guerrero y que resulta interesante porque se encuentra muy cercana a un cuerpo de agua, la cuenca Laguna Tuxpan como se puede observar en el mapa de la Figura 21 y que podría ser una de las causas de la presencia de tal efecto.

Por lo anterior, se ha decidido realizar un cálculo de deflexiones de la superficie para un volumen de agua equivalente al de la cuenca antes mencionada. Esto con el objetivo de probar si es posible que el agua depositada en la cuenca genere movimientos similares a los registrados en la señal GPS, se profundiza en este tema en el apartado 5.3 de este trabajo.

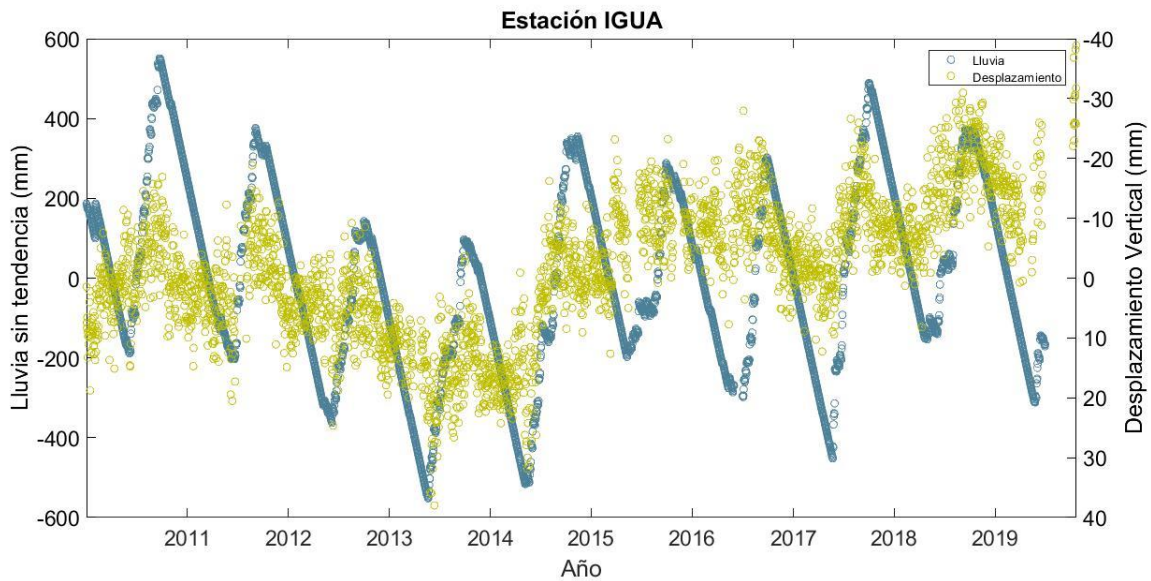


Figura 19. Gráfica del desplazamiento vertical (puntos amarillos) y la lluvia sin tendencia (puntos azules) para la estación IGUA.

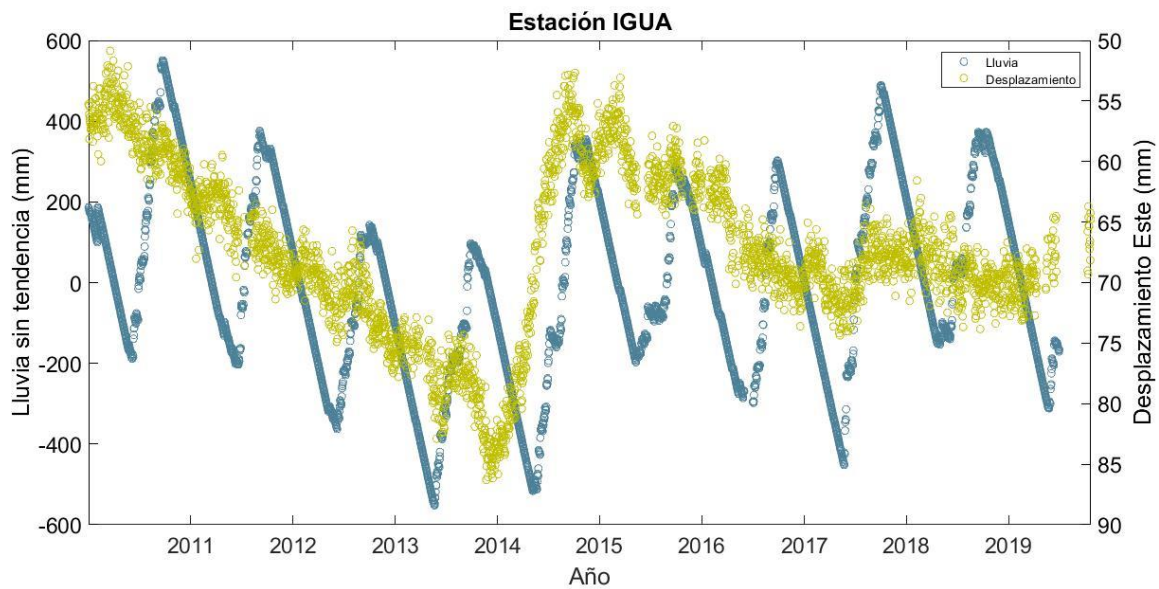


Figura 20. Gráfica del desplazamiento horizontal en dirección Este (puntos amarillos) y la lluvia sin tendencia (puntos azules) para la estación IGUA.

5.3 Cálculo de la deformación en superficie

Como se mencionó en el apartado 5.2, la estación GPS IGUA presenta una similitud muy notable entre los datos de GPS y lluvia, por lo cual en este apartado se explica el procedimiento que se siguió para la obtención del cálculo teórico de las deformaciones en la Cuenca Laguna Tuxpan producidas por la misma cantidad de lluvia y en el mismo periodo de tiempo, para posteriormente comparar los datos obtenidos del cálculo y los medidos por el GPS.

La obtención de este cálculo se llevó a cabo suponiendo una cuenca semi-elipsoidal que abarcara una superficie de 18 km², con lados de 6 km en dirección NW-SE y 3 km en dirección SW-NE como se muestra en el mapa de la Figura 21 representado en un rectángulo azul. Esta cuenca originalmente se planteó para representar solo la zona del lago; sin embargo, la cantidad de lluvia acumulada solo en esa zona no representa la acumulada en la cuenca; es por ello que se decidió ampliar el área de estudio de tal forma que se tomaron en cuenta los alrededores del lago donde la geología superficial presentara propiedades de permeabilidad adecuada para producir el efecto de acumulación de agua

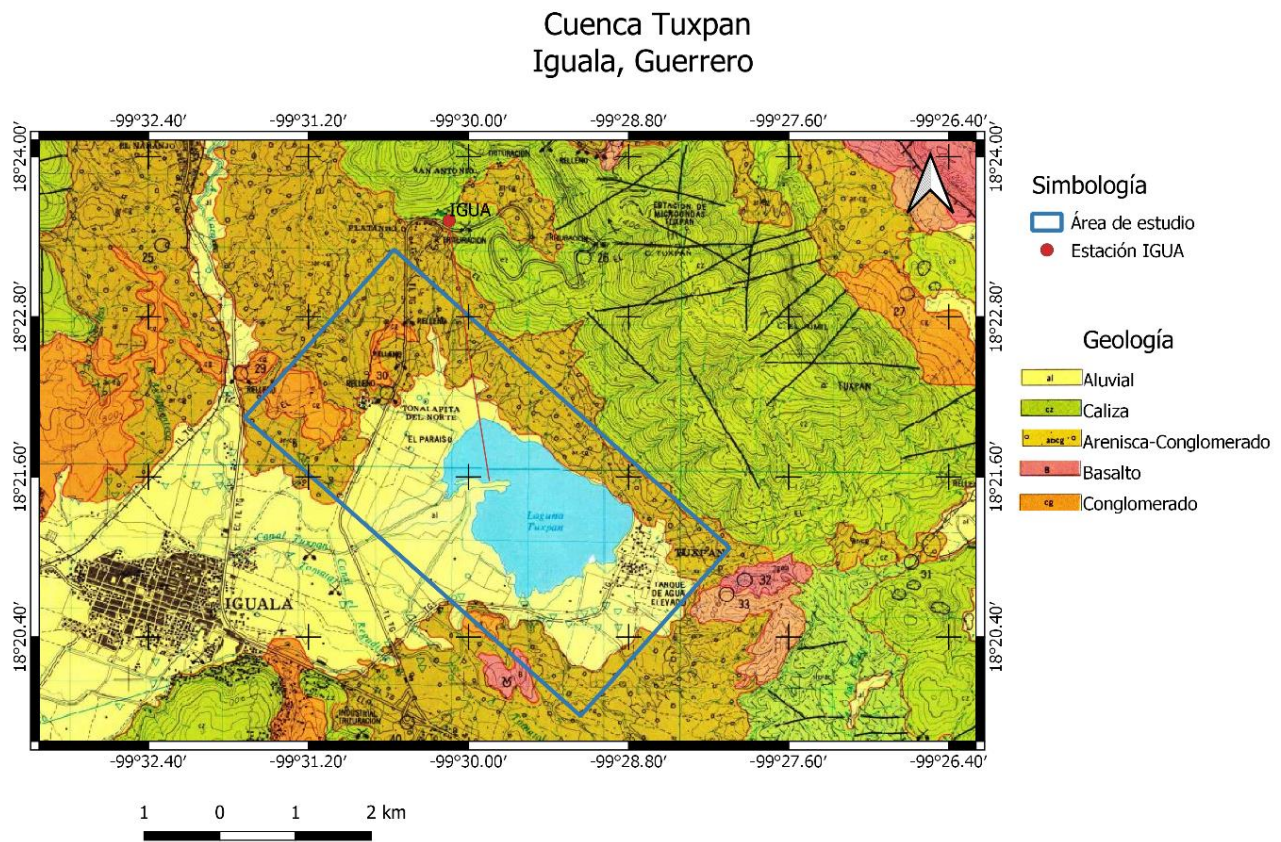


Figura 21. Mapa del área seleccionada para el cálculo de difracciones.

tanto superficial como en el subsuelo debajo de la laguna en cuestión.

La forma espacial 3D de esta cuenca se obtuvo mediante un programa Ad-hoc codificado en lenguaje Fortran (Santoyo, M., 2022), el cual crea una distribución teórica de la cuenca en profundidad con geometría elipsoidal; está es generada mediante una función elipsoidal multiplicada por una función bicoseno que funciona como un taper que da suavizamiento en los bordes, y a la cual se le puede dar un porcentaje de entre 0% y 50%. La relación de

aspecto del lago se puede modificar desde una forma simétrica $Y=X$ hasta un rectángulo de cualquier relación de aspecto $Y=kX$ (k real). Así mismo, la profundidad está escalada respecto a la profundidad máxima por lo cual también se le puede asignar cualquier profundidad máxima en metros.

La salida del programa es un archivo de posiciones que se graficaron en el software Surfer y que se visualizan en la Figura 22 que corresponde a la distribución teórica de la cuenca de 18 km^2 de área y que se obtuvo mediante el procedimiento ya mencionado y con los parámetros de cálculo mostrados en la Tabla 3.

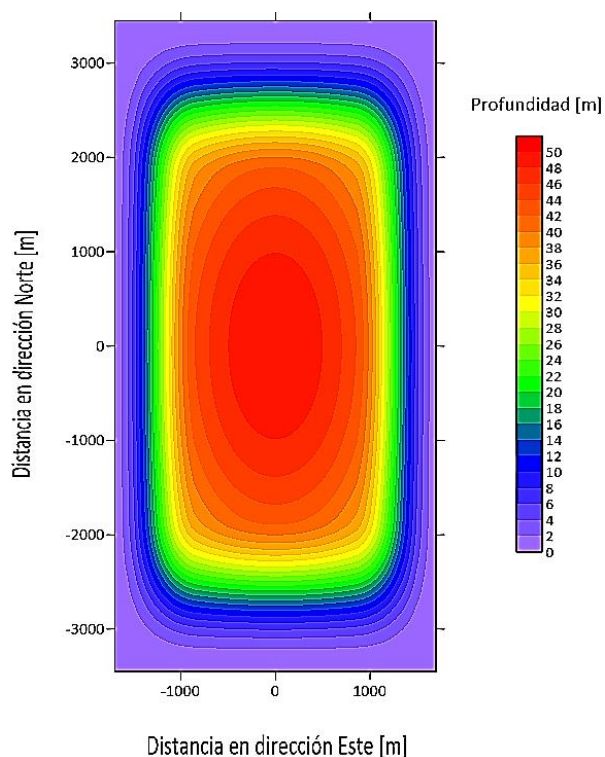


Figura 22. Distribución teórica de la cuenca Laguna Tuxpan

Dimensiones de la cuenca	
y=6000m	norte-sur
x=3000m	este-oeste
18 km ²	=18, 000,000 m ²
Relación x=1/2	a y=1
Parámetros de cálculo	
Numero de celdas en dirección este	X=31
Numero de celdas en dirección norte	Y=61
Celdas de tamaño	100m x 100m
Dim Característica de la celda	100m/2=50m
Profundidad máxima	100m

Tabla 3. Medidas y parámetros de cálculo utilizados para el cálculo de la distribución teórica de la cuenca.

Una vez obtenida la distribución teórica de la cuenca (Figura 22), se calcularon los desplazamientos para cargas verticales con un programa ad-hoc que utiliza las ecuaciones de Boussinesq como base matemática (Santoyo, 2022). Dicho programa requiere del archivo de la distribución de la cuenca y de un archivo con la serie de tiempo de las cotas de agua que en este caso corresponde a la información de lluvia que se menciona en el apartado 5.1.1. Datos de lluvia.

Así mismo el programa solicita algunos datos de las constantes elásticas del suelo como el valor de relación de Poisson y del módulo de Young, el cual se tomó para el rango que presentan las arenas-areniscas (Tabla 5), asumiendo una relación de vacíos en la cuenca de $\frac{1}{2}$ y permeabilidad superficial $k > 10^{-1}$ cm/s.

Debido a que el volumen de agua de la laguna representa una porción muy pequeña del agua acumulada en la cuenca (profundidad media del lago = 4.0m; CAPASEG- IMTA, 2013), en este trabajo se asume que la cota del espejo de agua es la de la superficie del terreno cuando el suelo se encuentra totalmente saturado. En este caso el espejo de agua del lago se encuentra a 750m sobre el nivel del mar (Ortega López, 2015), donde la profundidad máxima de la cuenca es de 100m; esto significa que cuando la cuenca está en nivel mínimo de saturación, la cota cero es la cota 650m sobre el nivel del mar, y cuando está totalmente saturada, la superficie del agua está a 750m sobre el nivel del mar.

Para el caso de esta distribución se consideró orientada hacia el noroeste y con centro en la laguna Tuxpan, siendo este punto la coordenada cero. Tomando en cuenta este sistema de referencia, se consideró que la estación IGUA se ubica en la coordenada 2439m Este y 2515m Norte como se indica en la Tabla 4.

Parámetros para el cálculo de desplazamiento por carga vertical
Relación de Poisson $\sigma=0.25$
Módulo de Young $E = 1.8 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Densidad equivalente del agua $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
Localización de la estación respecto del centro de la cuenca: 2439 m Este, 2515m Norte
Localización de la estación IGUA en coordenadas Geográficas Latitud: 18.392004° Longitud:-99.502441°

Tabla 4. Parámetro para el cálculo de desplazamiento por carga vertical

Lithology	Young's modulus (GPa = 1×10^3 MPa)	Poisson ratio (-)
Soft sandstone	0.7 – 6.9	0.2 – 0.35
Medium sandstone	13.8 – 34.5	0.15 – 0.25
Hard sandstone	41.4 – 68.9	0.1 – 0.15
Limestone	55.1 – 82.7	0.3 – 0.35
Coal	0.7 – 6.9	0.35 – 0.45
Shale	6.9 – 68.9	0.28 – 0.43

Tabla 5. Tabla del módulo de Young en GPa y la relación de Poisson para algunas rocas.

Capítulo 6. Resultados

En este capítulo se muestran los resultados de la aplicación de la metodología ya descrita. Como primer resultado nos enfocaremos en la relación que existe entre las señales de GPS de alta resolución y la serie de datos de lluvia respecto al tiempo. En la Figura 23 se puede observar dicha comparación para la estación TNAT ubicada en el estado de Oaxaca, y en la Figura 24 para la estación TNGF ubicada en la Ciudad de México. En ambos casos la lluvia graficada en puntos azul coincide con la señal GPS mostrada en puntos color verde.

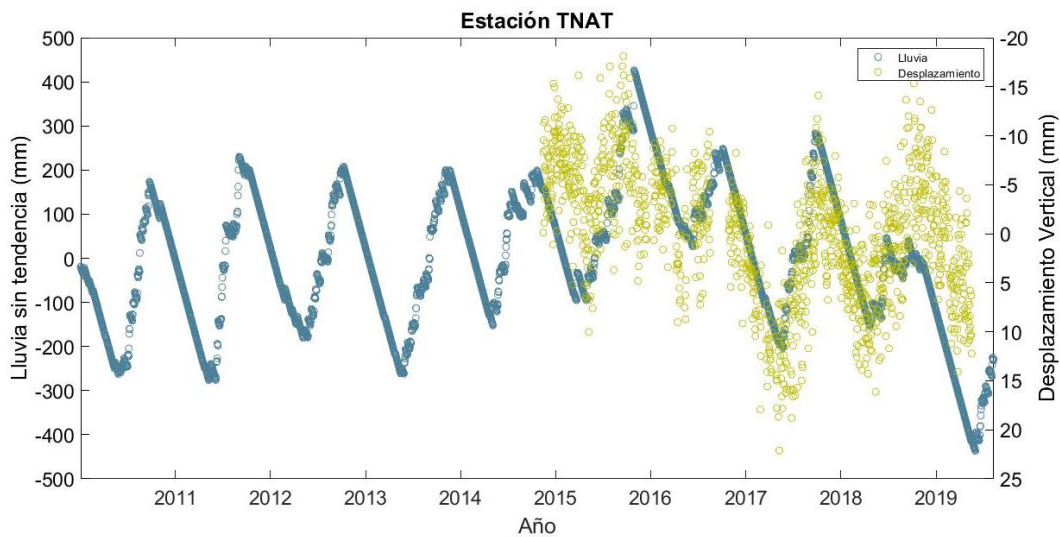


Figura 23. Gráfica de acumulación de lluvia y desplazamiento vertical durante los últimos 10 años en la estación TNAT. La serie de puntos azules se refiere a la lluvia y los puntos en color verde representan el desplazamiento.

Observando la estación TNAT podemos ver que existe una coincidencia de los datos de lluvia y de desplazamiento a partir del año 2015, que es la fecha desde la cual se cuenta con datos. La relación indica que al aumentar la cantidad de lluvia, el desplazamiento también aumenta de forma negativa. El significado del aumento hacia los números negativos indica que el desplazamiento vertical es en dirección hacia abajo.

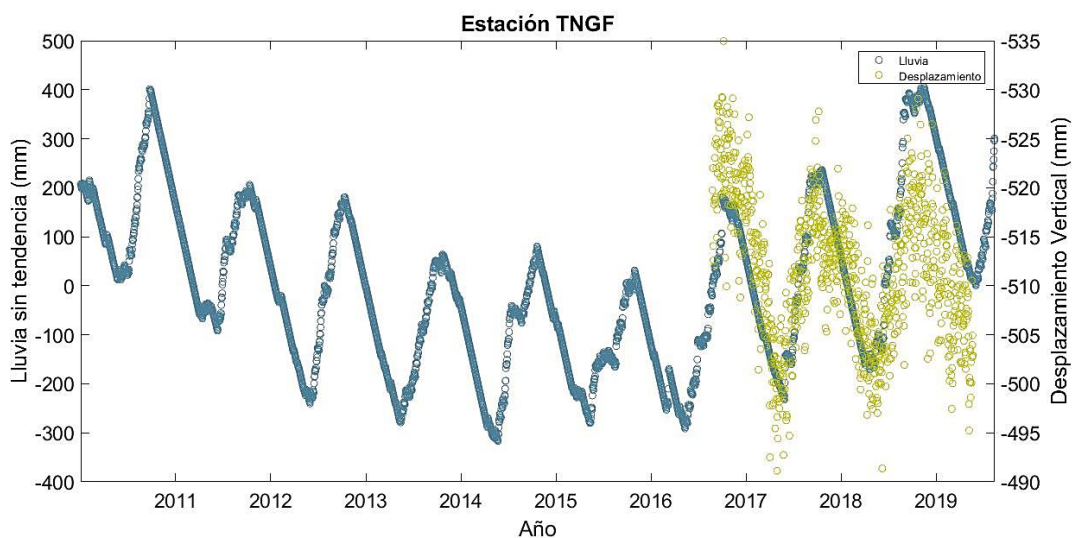


Figura 24. Gráfica de acumulación de lluvia y desplazamiento vertical durante los últimos 10 años en la estación TNGF. La serie de puntos azules se refiere a la lluvia y los puntos en color verde representan el desplazamiento.

La similitud entre el desplazamiento vertical y la precipitación se observa en 34 de las 43 estaciones GPS observadas. A continuación, en la Tabla 6 se enlistan las estaciones con esta similitud, que posiblemente indiquen una relación entre ambos.

Estaciones GPS donde se observa una relación de GPS y lluvia				
No.	Estación	Región	Latitud	Long
1	COMI	sur	16.2819	-92.1368
2	SABI	sur	18.967022°	-91.186578°
3	THIG	sur	14.882387°	-92.295769°
4	UVER	sur	19.1655	-96.1144
5	UXAL	sur	19.516400°	-96.924800°
6	VIL2	sur	17.990410°	-92.931096°
7	PEIG	Oaxaca	15.99769	-97.14755
8	MARO	Oaxaca	17.090900°	-94.884200°
9	OAX2	Oaxaca	17.078339°	-96.716738°
10	OAXA	Oaxaca	17.072607°	-96.733270°
11	TNAT	Oaxaca	18.1302	-98.0411
12	TNNP	Oaxaca	16.1205	-97.1420
13	TNNX	Oaxaca	17.4076	-97.2239

14	TOIG	Oaxaca	15.7538	-96.1296
15	HUAM	Oaxaca	18.0957	-97.0646
16	DEMA	Cd. México	20.300400°	-99.035364°
17	ICEP	Cd. México	19.0330	-98.1876
18	IGUA	Cd. México	18.392004°	-99.502441°
19	SSNX	Cd. México	19.3272	-99.1768
20	TNAL	Cd. México	19.1187	-98.6552
21	TNGF	Cd. México	19.3269	-99.1761
22	TOL2	Cd. México	19.293235°	-99.643470°
23	UTON	Cd. México	19.033500°	-98.316200°
24	ACYA	Guerrero	16.8380	-99.9029
25	ARIG	Guerrero	18.2805	-100.3437
26	AYUT	Guerrero	16.9878	-99.1453
27	CN24	Guerrero	19.5756	-88.0539
28	COYU	Guerrero	17.0085	-100.0811
29	LAZA	Guerrero	17.5193	-99.4866
30	TLIG	Guerrero	17.5620	-98.5660
31	TNIF	Guerrero	18.2710	-101.8950
32	YAIG	Guerrero	18.8623	-99.0672
33	ZIHP	Guerrero	17.6071	-101.4654
34	ZIHU	Guerrero	17.6069	-101.4650

Tabla 6. Listado de las estaciones donde se aprecia una posible relación entre los efectos de la lluvia y el desplazamiento GPS.

Así mismo, se presenta a continuación el resultado de los desplazamientos calculados con el programa basado en las ecuaciones de Boussinesq. Del programa se obtuvo una serie de tiempo del desplazamiento vertical que se produce la cantidad de lluvia registrada en la estación meteorológica más cercana a la estación IGUA y a la cuenca como la propuesta y modelada en este estudio. En la Figura 25 se observa en puntos color anaranjado la serie de desplazamiento obtenida del cálculo en comparación con la serie de desplazamiento vertical registrado con el GPS en la estación IGUA (puntos amarillos) en un periodo comprendido entre los años 2010 a 2020. Aun cuando ambas señales parecen coincidir, es a partir del año 2015 cuando parece existir un desfase entre ambas series, debido a que esta diferencia es notoria en todos los datos; es posible que esto se deba a algún ajuste hecho en los GPS u algún otro factor que altere todas las mediciones.

En la Figura 26 se graficó la señal de GPS de la estación IGUA, el desplazamiento calculado y la lluvia de la estación meteorológica más cercana juntas para obtener una comparación

y determinar la posible relación. En la gráfica es notorio que las tres señales coinciden e indican que un aumento en la cantidad de lluvia corresponde a un aumento en el desplazamiento vertical hacia abajo en el modelo matemático y también en los datos de campo.

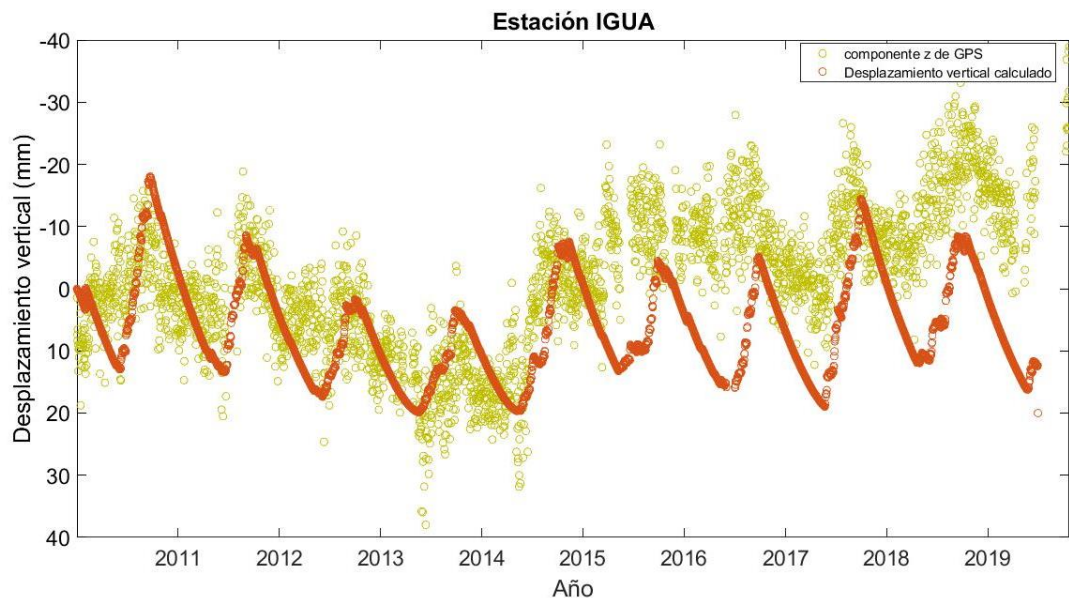


Figura 25. Gráfica de la componente vertical del GPS (puntos amarillos) y de la serie de desplazamiento vertical calculada (puntos anaranjados) para el periodo de tiempo de 2011 a 2020.

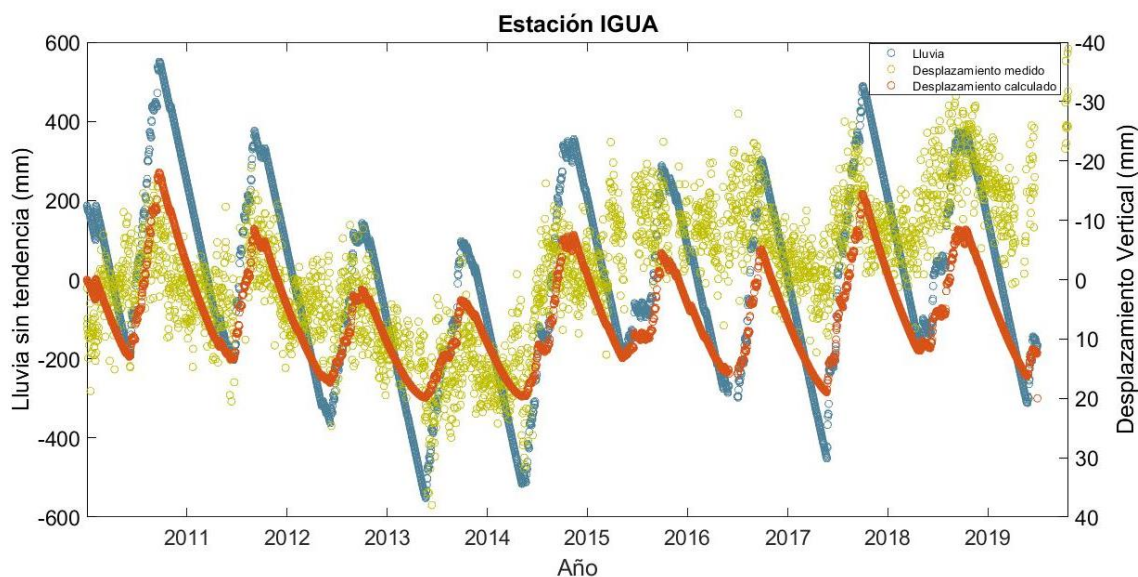


Figura 26. Gráfica de la componente vertical del GPS (puntos amarillos), serie de desplazamiento vertical calculada (puntos anaranjados) y lluvia (puntos azules) para el periodo de tiempo de 2011 a 2020.

Al inicio de este trabajo se describe que los datos de desplazamiento vertical obtenidos mediante GPS de precisión correspondientes a la región centro y sur de México entre el año 2010 y 2020 muestran un comportamiento cíclico; debido a estos patrones que parecen repetirse con el paso de los años, se sospechó que podrían estar relacionados con un fenómeno temporal. Por lo anterior se decidió obtener una comparación de estos desplazamientos con las precipitaciones pluviales registradas por sitios cercanos a cada estación GPS.

La comparación ya mencionada fue realizada y se logró mostrar que la cantidad de precipitación es un factor que sí guarda una relación directa con la cantidad de deformaciones el sitio, ya que ambas series de datos exhiben un comportamiento similar. La relación que existe entre ambos conjuntos de datos se presenta cuando al registrarse un aumento de precipitación, los datos de GPS también registran un aumento en su componente de desplazamiento vertical; en las gráficas, este aumento se observa hacia los números negativos, lo cual indica un desplazamiento hacia abajo, este fenómeno se aprecia en la mayor parte de estaciones analizadas, i.e. en 34 de 43.

Con respecto al cálculo obtenido para el área de la cuenca Laguna Tuxpan, con base en los resultados podemos concluir que la acumulación de agua de lluvia sí es capaz de provocar deformaciones de la magnitud que se registra en la estación más cercana a la cuenca, IGUA. Lo anterior debido a la similitud en la comparación entre las deformaciones calculadas teóricamente y las registradas por el GPS de alta resolución.

Capítulo 8. Referencias

- Argus, D. F., Fu, Y., & Landerer, F. W. (2014). Seasonal variation in total water storage in California inferred from GPS observations of vertical land motion. *Geophysical Research Letters*, 41, 1971–1980. <https://doi.org/10.1002/2014GL059570>
- Argus, D. F., Ratliff, B., DeMets, C., Borsa, A. A., Wiese, D. N., Blewitt, G., Crowley, J. W., Martens, H. R., Kreemer, C., & Landerer, F. W. (2020). Rise of Great Lakes Surface Water, Sinking of the Upper Midwest of the United States, and Viscous Collapse of the Forebulge of the Former Laurentide Ice Sheet. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(9), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2020JB019739>
- Borsa, A. A., Agnew, D. C., & Cayan, D. R. (2014). Ongoing drought-induced uplift of the western United States. *Science*, 345(6204), 1587–1590. <https://doi.org/10.1126/science.1260279>
- Blewitt, G., Lavallée, D., Clarke, P., & Nurutdinov, K. (2001). A new global mode of Earth deformation: Seasonal cycle detected. *Science*, 294(5550), 2342–2345. <https://doi.org/10.1126/science.1065328>
- Comisión Nacional del Agua. (s.f.). *Información Estadística Climatológica*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>.
- Comisión de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento del Estado de Guerrero (CAPASEG) – Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2013). Estudio para la identificación de las causas, niveles y grado de contaminación ambiental en la Laguna de Tuxpan; Gro. Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua. Jiutepec, Morelos
- Dong, D., Fang, P., Bock, Y., Cheng, M. K., & Miyazaki, S. (2002). Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series. *Journal of Geophysical Research*, 107(B4), 2075. <https://doi.org/10.1029/2001JB000573>
- Fu, Y., Argus, D. F., & Landerer, F. W. (2015). GPS as an independent measurement to estimate terrestrial water storage variations in Washington and Oregon. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 552–566. <https://doi.org/10.1002/2014JB011415>.
- Federal Aviation Administration, U.S. (s.f.). *Satellite Navigation - GPS - Control Segment*. https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/tech_ops/navservices/gnss/gps/controlsegments
- González, R. Banderas, A. (2016). *Aproximación holística En el manejo integrado de las cuencas, para la conservación y recuperación de cuerpos de agua superficiales*.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <https://www.gob.mx/imta/documentos/aproximacion-holistica-en-el-manejo-integrado-de-las-cuencas-para-la-conservacion-y-recuperacion-de-cuerpos-de-agua-superficiales>.

Gualandi, A., Serpelloni, E., & Belardinelli, M. E. (2016). Blind source separation problem in GPS time series. *Journal of Geodesy*, 90(4), 323–341. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0875-4>

Husker, A. (2021). Comunicación personal.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2013). *Estudio para la Identificación de las Causas Niveles y Grado de Contaminación Ambiental en la Laguna de Tuxpan, Guerrero y Propuestas para el Tratamiento de las Aguas Residuales Descargadas en Ella y sus Afluentes*. IMTA-CAPASEG. Informe Final. Convenio CCE.01.04.3.0.2013.-0231. México.

Johnson, C. Affolter, M. Inkenbrandt, P. Mosher, C. (2017). *An introduction to Geology*. Salt Lake Community College. <https://geo.libretexts.org/@go/page/8515>

Kazachkina, E. (2022). Comunicación personal.

Larochelle, S., Gualandi, A., Chanard, K., & Avouac, J. P. (2018). *Identification and Extraction of Seasonal Geodetic Signals Due to Surface Load Variations*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(12), 11,031-11,047. <https://doi.org/10.1029/2018JB016607>

Michell, J.H. *Some elementary distributions of stress in three-dimensions*. *Proc. Lond. Math. Soc.* 32 (1900) 23±35.

Ortega López, Susana (2015) Retos para la gestión integrada del agua en la cuenca laguna de Tuxpan, Gro. Tesis de Maestría IMTA. Mexico.

Reynolds, J. M. (1997). An introduction to applied and environmental geophysics. In *An introduction to applied and environmental geophysics*. <https://doi.org/10.1071/pvv2011n155other>

Santoyo, M. (2022). Comunicación personal

Selvadurai A.P.S. (1999). *On Boussinesq's problem*. Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University. *International Journal of Engineering Science*. Volumen 39, pag. 317-322.

Sneddon, I. N. (1951). *Fourier Transforms* McGraw-Hill Book Co. Inc., New York.

SSN, Red de estaciones: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Servicio Sismológico Nacional, México. Extraído el 10 de enero de 2017 desde <http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/ultimos>

U.S. Geological Service. (s.f.). *Earthquake Processes and Effects*. <https://earthquake.usgs.gov/research/eqproc/deformation.php>

U.S. National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing. (s.f.). Sistema de Posicionamiento Global. <https://www.gps.gov/spanish.php>.

van Dam, T., Wahr, J., Milly, P. C. D., Shmakin, A. B., Blewitt, G., Lavalée, D., & Larson, K. M. (2001). Crustal displacements due to continental water loading. *Geophysical Research Letters*, 28(4), 651–654. <https://doi.org/10.1029/2000GL012120>

A) Código de MATLAB

```
close all
clear all

fid=fopen('lluvial.txt');
A = fscanf(fid, '%g/%g/%g %g %g %g %g',[7 inf]);
fclose(fid);

lluvia=A(4,:);
y=A(3,:);
mo=A(2,:);
da=A(1,:);

lluviadn=datenum(y', mo', da');
I=find(lluviadn>datenum(2016, 01, 01));
lluviadn=lluviadn(I);
lluviadt=cumsum(lluvia(I))';

p=polyfit(lluviadn,lluviadt,1);

figure(3)
% yyaxis left
plot(datetime(lluviadn, 'convertfrom', 'datenum'),lluviadt-p(2)-
lluviadn*p(1),'o','Color',[0.5 0 0.7])
ylabel('Rain detrended (mm)','Color','k')
set(gca, 'fontsize', 20,'YColor','k')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% YAIG %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
yyaxis right
load YAIG.dat
YAIGdn=datenum(YAIG(:,1), YAIG(:,2), YAIG(:,3));
I=find(YAIGdn>datenum(2017, 01, 01));
YAIGdn=YAIGdn(I);
YAIGdt=YAIG(I,8)*1000; %columna 6 es desplazamiento este y 8 vertical
I=find(YAIGdn>datenum(2016,01,01) & YAIGdn<datenum(2014,01,01));
p=polyfit(YAIGdn(I),YAIGdt(I),1);
plot(datetime(YAIGdn, 'convertfrom', 'datenum'),YAIGdt,'o','Color',[0.5 0.5 0.7])

ylabel('Position Z-component (mm)','Color','k')
set(gca, 'fontsize', 20,'YColor','k')
ax=gca;
ax.YAxis(2).Direction='reverse';
title('Estación YAIG')
```

B) Señal GPS vs Lluvia

