

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

Contenido

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN | 1 |
| Objetivo | 4 |
| Generales de GRACE | 4 |
| Metodología general de productos GRACE..... | 5 |
| CAPÍTULO II FILTRO Y CONSTRUCCIÓN DE LA FUNCIÓN EFECTIVA DE CUENCA..... | 11 |
| Productos GRACE LEVEL 2 | 12 |
| Función efectiva de cuenca y TWE (Total Water Estimation) | 15 |
| CAPÍTULO III “ESTIMACIÓN DEL ERROR” | 28 |
| CONCLUSIONES | 42 |
| REFERENCIAS | 43 |

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

La misión GRACE de la NASA tiene como objetivo mapear cambios en el campo gravitacional terrestre. Esta consiste en dos satélites gemelos que se encuentran separados alrededor de 220 [km] en una órbita polar a 500 [km] de altura, los cuales registran cambios en el campo gravitacional a través de mediciones precisas de la distancia que los separa, esto último se logra empleando sistemas microondas y GPS de abordo.

Los satélites realizan mediciones en la altura del geoide con una precisión de 2 a 3 [mm] y una resolución espacial tan pequeña como 400 [km]. El ciclo anual en las variaciones del geoide es de hasta casi 10 [mm] en algunas regiones, cuyos picos predominan en las estaciones de primavera y verano. Las variaciones en el geoide pueden atribuirse en gran medida a cambios en las masas de agua, como por ejemplo variaciones de la masa de agua en la atmosfera, en hielo, en nieve, o en el océano.

La responsabilidad para la extracción del modelo gravitacional terrestre recae en el SDS del proyecto GRACE. El SDS se distribuye en tres laboratorios; el UTCSR, el JPL y el GFZ, quienes generan las soluciones finales para cada nivel de producto (**Figura 1**).

Los datos obtenidos de GRACE se dividen en tres niveles:

- Level 1-A: Son los datos crudos, obtenidos directamente del satélite, que se calibran y etiquetan en tiempo. No están disponibles al público.
- Level 1-B: Datos Level 1-A que pasan por procesos extensivos e irreversibles, los cuales se limpian y editan para generar productos de segundo orden. Estos incluyen: rango inter-satelital, estimación de enfoque, rango sesgado, rango de aceleración, corrección geométrica, datos de la cámara STAR, órbitas, De-aliasing atmosférico y oceánico y nivel oceánico.
- Level 2: Datos Level 1-B procesados para generar estimaciones mensuales del campo gravimétrico en la forma de coeficientes de armónicos esféricos

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

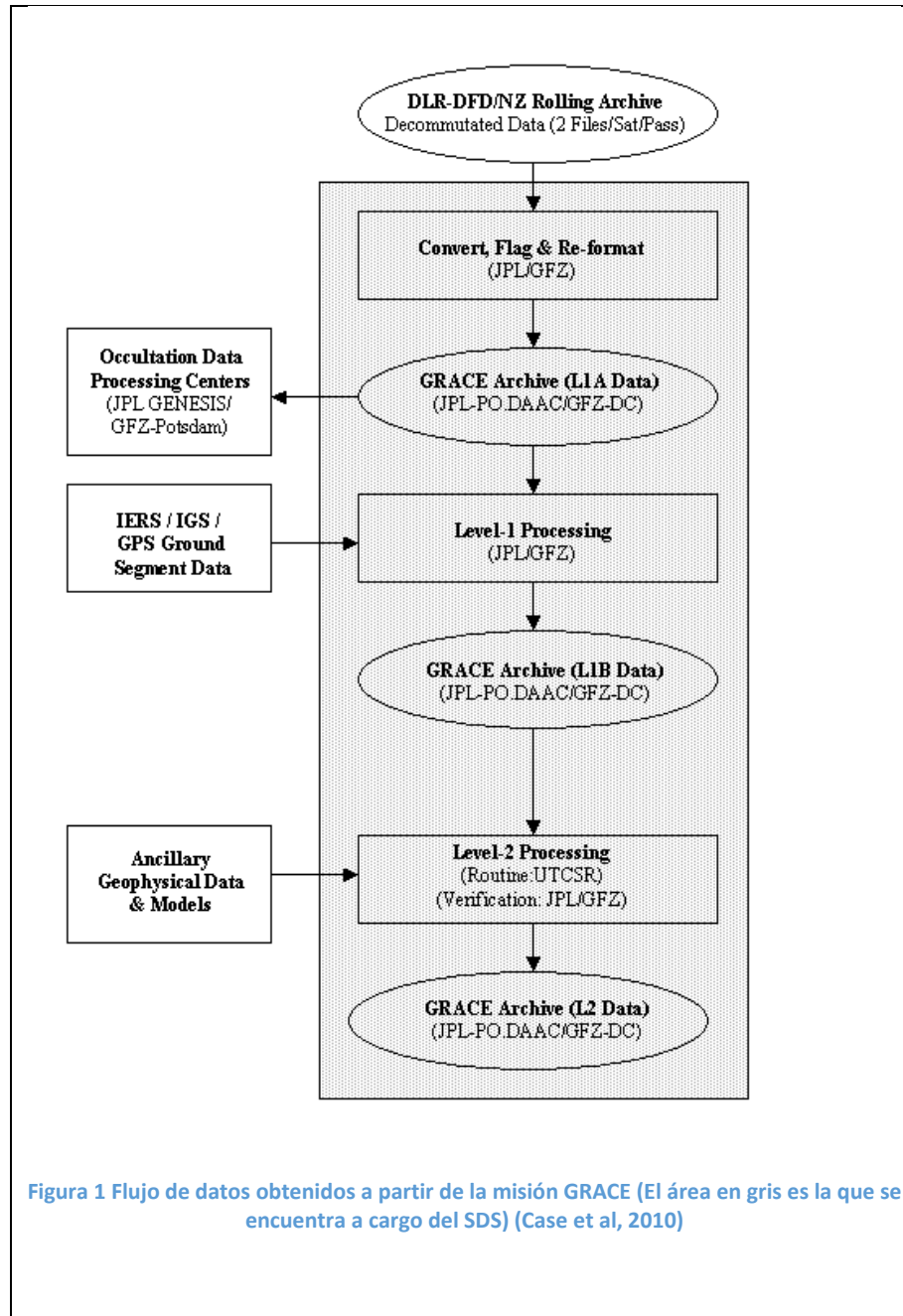
PROYECTO TH1503.1

(SH). Ocasionalmente, se combinan varios meses de información para estimar la media o campo gravitacional estático.

- Level 3: Estos datos son generados por los usuarios del proyecto GRACE (GRACE Tellus, CU Boulder, ICGEM, etc.) y consisten en productos con valor agregado generados a partir de datos Level-2, entre los que destacan mapas de cambios en el espesor equivalente de agua, ajuste isostático, suavizado espacial de datos y *destriping*.

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD "GRACE" Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1



ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

Las variaciones de gravedad obtenidas por medio de GRACE ayudan a entender el almacenamiento de calor oceánico, el comportamiento de corrientes oceánicas profundas, cambios en el nivel y almacenamiento de agua, la acumulación de masas de hielo polar, el comportamiento de agua superficial y almacenamiento de agua subterránea (Tapley et al, 2004).

A partir de las estimaciones del campo gravitacional, se realizan estimaciones de cambios de masa variables en el tiempo, promediadas sobre regiones arbitrarias que tienen escalas de cientos de kilómetros, con las cuales se determinan aproximaciones de espesores de agua de hasta 1 cm (Swenson and Wahr, 2002).

Objetivo

General

Diseñar el filtro de escalamiento-cuenca que separe la componente sesgada y la de filtración, de los coeficientes de los armónicos esféricos, nivel 2, de las bases de GRACE, para reducir la escala de resolución y aplicarse en acuíferos en el territorio Mexicano.

Generales de GRACE

Desde el 2002, la misión GRACE, en conjunto con modelos hidrológicos y observaciones *in situ*, se ha empleado para generar estimaciones en la variación del almacenamiento de agua subterránea (GWS) (Tapley et al; 2004, Wahr et al., 2004; Syed et al., 2008).

Los datos Level 2 (Coeficientes SH) se emplean para estimar cambios mensuales en el almacenamiento de agua, tanto en tierra como en el océano. Cada solución consiste en un conjunto de coeficientes de Stokes, C_{lm} y S_{lm} , completos a un grado (l) y orden (m) ≤ 120 . Estos coeficientes se emplean en una expansión de

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

armónicos esféricos del geoide (**EC. G01**) y cuyo grado determina la escala (resolución) horizontal (**EC. G02**)

Debido a que GRACE es sensible a los cambios de agua verticalmente integrados a través de una columna de agua y se extiende a lo largo de cientos a miles de [km], no existe información relevante con la cual comparar dichos cambios. En su lugar se obtiene una evaluación inicial de la información comparándola visualmente con modelos numéricos restringidos. Una evaluación cuantitativa es entonces estimada a partir de un análisis basado en la dispersión a lo largo de una dependencia temporal: una constante más una variación anual (Wahr et al, 2004).

Metodología general de productos GRACE

Longuevergne et al. (2010) han propuesto una metodología para estimar cambios hidrológicos en cuencas pequeñas, la cual puede resumirse en cuatro grandes puntos como:

A. Corrección de las variaciones medidas para fuentes bien reconocidas.

GRACE responde a todas las redistribuciones de masa cercanas a la superficie Terrestre, por lo que es importante corregir las variaciones medidas provenientes de influencias bien identificadas tales como:

- Redistribución de masas atmosféricas,
- Redistribución de masas oceánicas debidas a corrientes y vientos,
- Mareas terrestres sólidas y oceánicas.

Dichas correcciones se realizan por medio del **De-aliasing** de los datos Level 1-B. Sin embargo, y debido a su dependencia temporal, estos productos son imperfectos, por lo cual en cada versión (R por la sigla en inglés de *release*), se reprocesan los datos desde el lanzamiento de la misión en 2002.

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

Actualmente se encuentra disponible la versión R05 de los datos Level 2, con lo cual se trabajó en este proyecto. Estos datos representan los cambios totales de gravedad debidos a hidrología superficial, cambios en la criósfera, procesos eventuales (Terremotos), ajuste isostático glacial y correcciones a los modelos de procesos oceánicos y atmosféricos (*Center for Space Research* CRS-UTEXAS). Páginas adelante se describe como se accede y se respaldan los datos de Level-2.

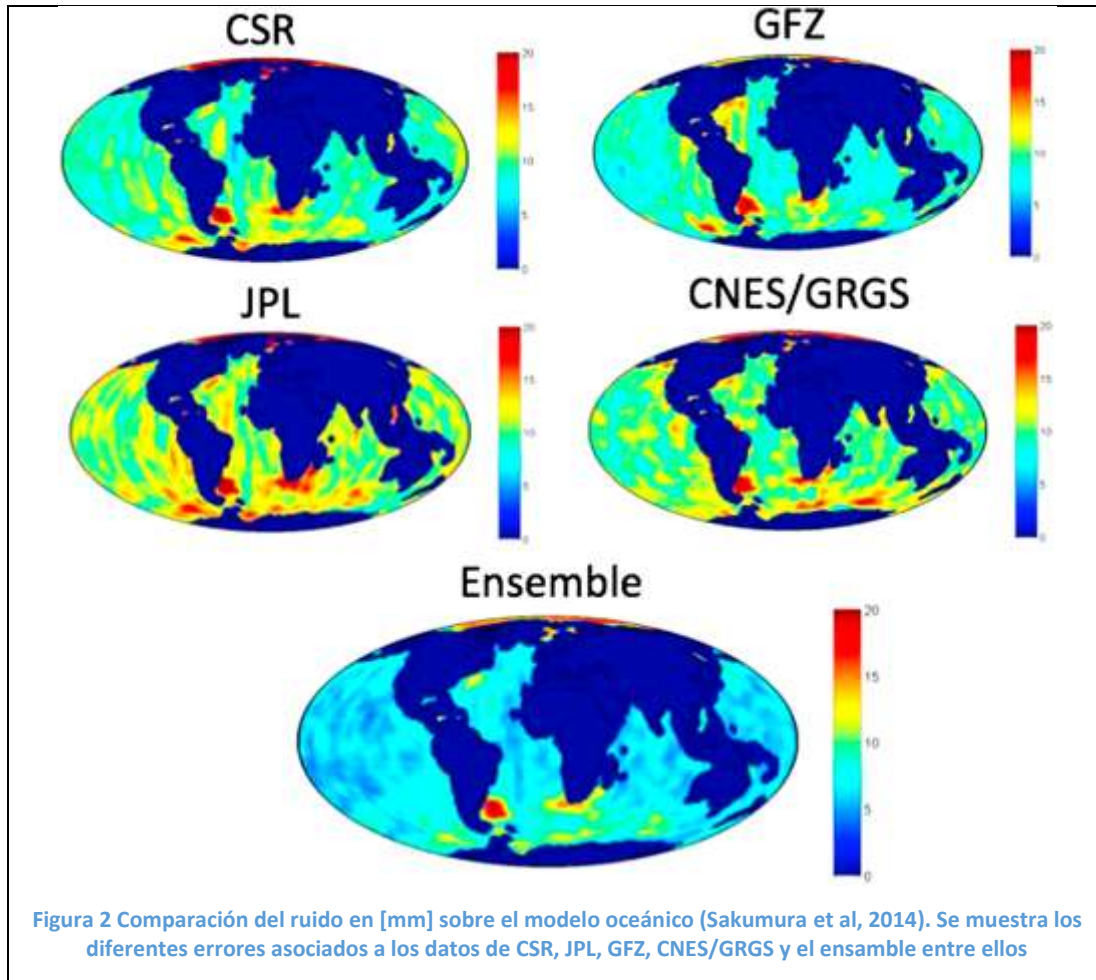
B. Obtención de la expansión del campo gravimétrico por medio de armónicos esféricos (SH).

Como se mencionó previamente, los datos Level 2 se refieren a los coeficientes de Stokes de grado l y orden m generados por GRACE. Estos nos permitirán estimar el modelo de gravedad estático y sus variaciones mensuales (**Ec G01**), con resultados variantes de acuerdo al grado y orden que se encuentren disponibles, así como la versión y el organismo que las distribuya.

Cada organismo tiene una estrategia para resolver los coeficientes SH y las diferencias entre las 3 soluciones (JPL, CSR y GFZ) nos permiten inferir el nivel de incertidumbre en cada solución. Ya que las diferencias entre las soluciones son muy pequeñas, Sakumura et al. (2014) proponen un ensamble entre ellas, el cual consiste de un promedio aritmético ponderado como una forma efectiva para reducir el ruido en la solución del campo gravimétrico (ver Figura 2).

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1



Elegida una solución adecuada de los datos se puede estimar el modelo gravimétrico a una resolución adecuada al tamaño de la cuenca de estudio. Sin embargo, a pesar de que la expansión de los coeficientes SH nos genera mapas en los cambios de masa superficiales, estos no pueden interpretarse simplemente de pixel a pixel, como en el caso de las imágenes de percepción remota. En su lugar, se deben realizar una comparación con modelos y observaciones independientes, a la misma resolución espacial que la expansión SH (**Ec. G02**).

C. Delimitación de la cuenca y/u obtención de la función de cuenca efectiva.

Para poder estimar cambios de masa superficiales en una región de interés R con un área R_0 , es necesario una función de cuenca, la cual se encuentra definida como 1 dentro de R y como 0 fuera de la cuenca (**Ec. G03**). Si el grado y orden aproximan al infinito, la función de cuenca se aproxima a su forma ideal, sin embargo, para un grado y orden máximos finitos la función de cuenca será solo una aproximación (Figura 3). Una vez definida una función de cuenca puede estimarse el almacenamiento de agua \hat{S}_0 como una combinación lineal de los coeficientes de Stokes proporcionados por GRACE (**Ec. G04**)

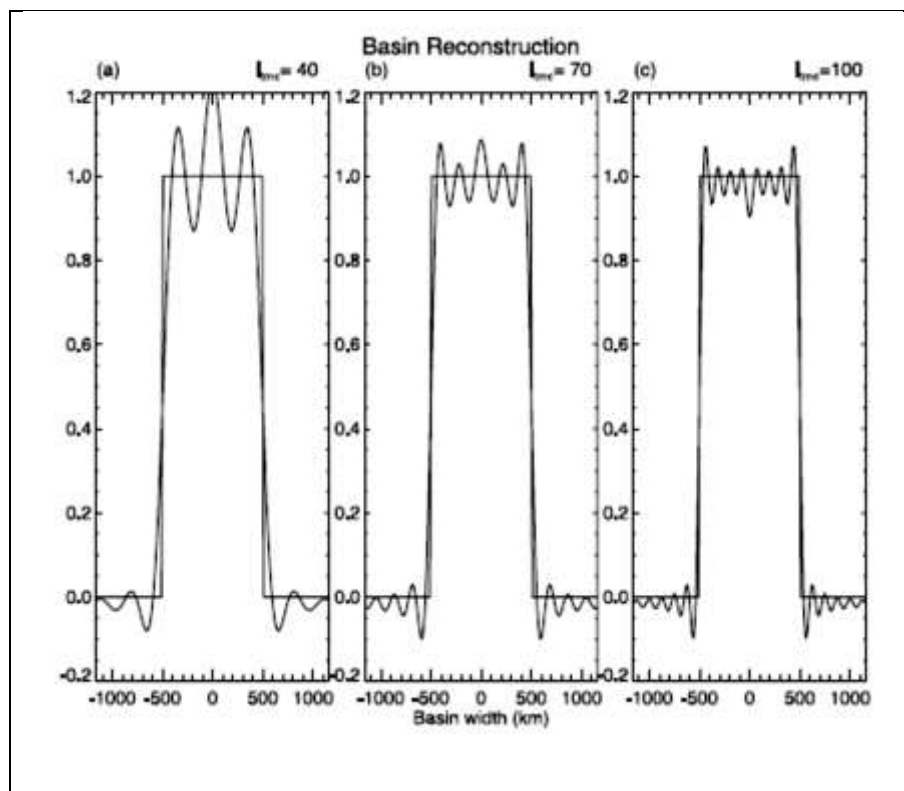


Figura 3 Sección de una cuenca reconstruida para varios L_{max} (Swenson & Wahr, 2002)

La función de cuenca efectiva \hat{h} (FCE) se define como la función espacial en la superficie, y sus coeficientes SH correspondientes se procesan con el objetivo de

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

maximizar la resolución dentro de la región de interés y el filtrado de coeficientes SH de orden y grado altos para eliminar ruido. La FCE describirá la habilidad de GRACE para determinar un promedio en los cambios de almacenamiento de agua dentro de la región de interés. La efectividad de la FCE estará en función de una concentración cercana a la unidad (habilidad para describir la cuenca de interés, tendencia) y el rechazo de las contribuciones provenientes de las áreas circundantes (efecto de *leakage*). En el presente se propone emplear el método adaptativo propuesto por Swenson et al (2003) para estimar la función de cuenca, el cual minimiza la suma de los errores de GRACE y *leakage*.

D. Estimación de la concentración.

La calidad de la FCE se estima por medio de la relación de concentración, la cual se define como un factor en función de la región de la cuenca y la cuenca (Ec. G05), dicha relación estima la varianza originada por las afueras de la región de interés, por lo que una concentración de 0.9 se puede interpretar como que solo el 10% de la energía proviene fuera de la región de interés. La tendencia y el *leakage* dependen de la variación en el almacenamiento de agua (dentro y fuera de la cuenca), por lo cual deben estimarse a partir de modelos hidrológicos.

- **Diseño e implementación del filtrado.** Como se mencionó se obtiene una mejor resolución espacial a costa de datos más ruidosos, por lo que es necesario implementar un filtro que suprima los coeficientes SH ruidosos. En el presente se propone emplear un filtro óptimo Wiener isotrópico como el propuesto por Sasgen et al (2006).

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

- **Corrección de la tendencia y efecto de leakage.** Se corrigen los efectos de concentración empleando un modelo hidrológico a priori. A partir del modelo se estima un factor de re escalamiento equivalente como un cociente del valor promedio de almacenamiento de agua del modelo hidrológico sobre la cuenca entre los valores determinados a partir de la FCE y después del filtrado de los coeficientes SH. La ventaja de este método es que confía solo de manera parcial en el modelo hidrológico a priori. El modelo hidrológico puede obtenerse de la GLDAS NOAH
- **Estimación del error.** Una vez que se ha estimado la FCE, se han filtrado los coeficientes SH y corregido los efectos de concentración, se estima un error de las correcciones el cual consistirá en la sumatoria de los errores de estimación de GRACE amplificados por la corrección de la tendencia + error debido a los efectos de concentración + error de la corrección de *leakage* asociado al modelo hidrológico. Adicional a estos, existe el error asociado a los datos de GRACE y los cuales se pueden corregir empleando la metodología propuesta por Wahr et al (2004)
- **Obtención del residual.** Después de remover los productos de *dealiasing* y los efectos del campo gravitacional sólido se obtiene el residual de la señal, el cual se deberá principalmente a variaciones en el almacenamiento de agua.

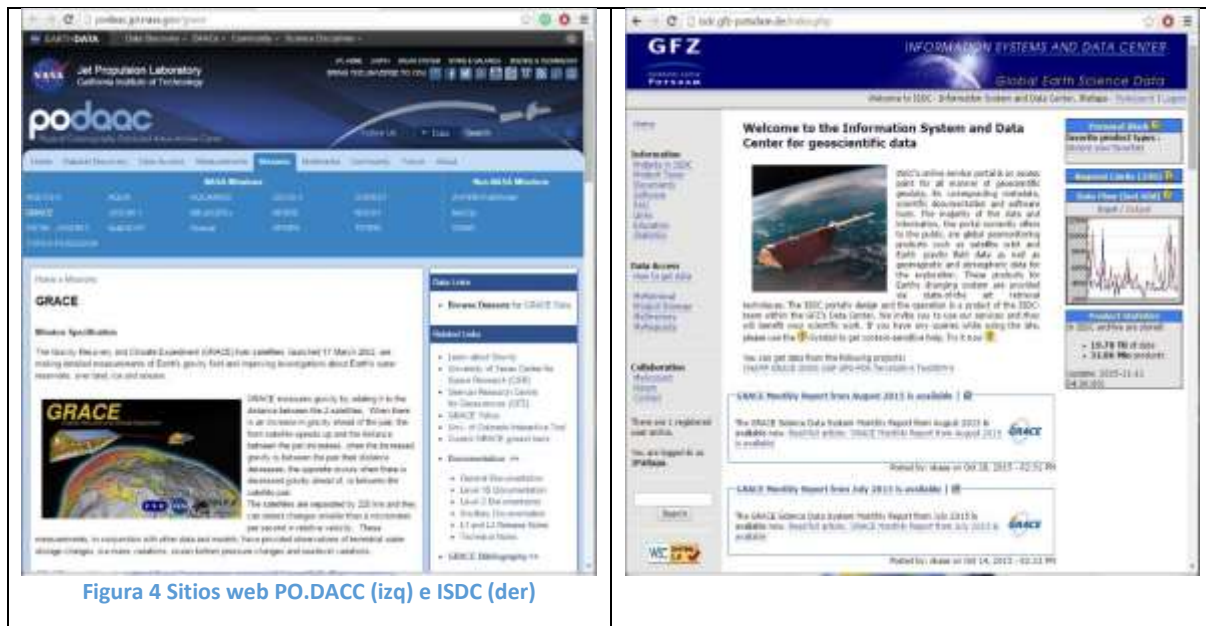
ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

CAPÍTULO II FILTRO Y CONSTRUCCIÓN DE LA FUNCIÓN EFECTIVA DE CUENCA

Como se comentó anteriormente, el procesado de los datos de la misión GRACE está a cargo del SDS. Una vez que el SDS valida los datos, todos los productos Level-2 y Level-1B se liberan al público a través de dos portales:

- *Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC)*, ubicado en el JPL en Pasadena. USA. Web: <http://podaac.jpl.nasa.gov/grace>
- *Information System & Data Center (ISDC)*, ubicado en GFZ en Postdam, Alemania. Web: <http://isdc.gfz-potsdam.de/grace>



En ambos portales se pueden obtener los productos de GRACE procesados por el respectivo centro de procesado, pero solo en el portal del ISDC se puede acceder a los productos de los tres centros de procesado (CSR, JPL y GFZ), por lo cual se eligió trabajar con dicho centro.

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

Para acceder a los datos solamente es necesario acceder al portal del ISDC y registrar una cuenta de usuario, para lo que solo se requiere un nombre de usuario y una dirección de correo electrónico. Acto seguido se puede buscar (*Product Browser*) y solicitar (*MyRetrival*) cualquier producto Level-1B y Level-2 de la misión. Otra forma es seleccionar de una lista de productos (*Product Types*), indicar el formato de año, el rango de fechas a elegir, la versión del producto y el centro de procesado.

Una vez seleccionados los archivos deseados se genera, de manera automática, una solicitud al ISDC para que facilite los datos al usuario, la respuesta a la solicitud tarda aproximadamente 24 horas y el usuario solo puede pedir acceso a un límite de 1000 MB y/o 1000 archivos por día. El ISDC responde a la solicitud con un correo y la liga al servidor en el cual se almacenan todos los datos que ha solicitado el usuario, a este último se accede con el mismo nombre de usuario y contraseña que se usa para acceder al ISDC.

Productos GRACE LEVEL 2

Existen diferentes productos Level-2 disponibles por lo que es necesario saber identificar cuáles son los datos que son útiles para nuestros objetivos. Un producto GRACE Level-2 del campo gravimétrico es un conjunto de coeficientes de esféricos armónicos del geopotencial exterior (Bettadpur, 2012). El nombre de cada producto se especifica como:

PID-2_YYYYDOY-YYYYDOY_dddd_sssss_mmmm_rrrr

Donde

- PID: es el identificador mnemónico del producto de 3 caracteres
- -2: Denota que se trata de un producto GRACE LLevel-2

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

- YYYYDOY-YYYYDOY: especifica el rango de fechas (en formato año y día del año) de los datos empleados para generar el producto
- dddd: es el número de días del calendario cuyos datos se emplearon para generar el producto
- sssss: es una cadena de caracteres que indica la institución que procesa los datos
- mmmm: es una cadena de 4 caracteres que se puede emplear de forma libre (e.g. empleada para distinguir soluciones restringidas de no restringidas)
- rrrr: 4 dígitos que indican el número de la versión (0000, 0001, ...)

El PID se genera al combinar los siguientes 3 caracteres:

1er carácter

- G: Coeficientes del Geopotencial

2do carácter

- S: Estimaciones hechas solo a partir de los datos de GRACE
- C: Combina estimaciones a partir de GRACE e información gravitacional terrestre
- E: Cualquier modelo de fondo especificado como una serie de tiempo
- A: Promedio de cualquier modelo de fondo sobre un periodo de tiempo

3er carácter

- M: Estimación del campo estático. (Los archivos para este producto también contienen registros con las épocas y tazas empleadas para modelar cambios seculares en el modelo gravitacional de fondo)
- U: Estimación del Geopotencial relativa al modelo gravitacional de fondo.
- T: Modelo total de gravedad de fondo, excepto por el modelo estático.
- A: Atmosfera, no asociada a marea

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD "GRACE" Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

- B: Océanos, no asociado a marea
- C: Combinación de atmosfera y océano, no asociado a mareas
- D: Presión de fondo sobre océanos, cero sobre tierra.

No todas las posibles combinaciones de caracteres tienen sentido, o se proveen como productos. Para la versión R05 se encuentran disponibles: GSM, GAA, GAB, GAC y GAD.

Para los objetivos del presente trabajo se emplearan los datos Level-2 GAC los cuales proporcionan los Coeficientes Geopotenciales promedio sobre un periodo de tiempo y corregidos por los efectos de atmósfera y océanos no asociados a mareas.

En la Figura 5 se muestra un ejemplo de un archivo GAC.

Figure 5 shows a screenshot of a GAC file. The file is named 'GAC_2_2006001-2006031_0031_EIGEN_G_0005'. The content of the file is as follows:

```

FIRST GAC-2_2006001-2006031_0031_EIGEN_G_0005 SHM GFZ POTSDAM 20120314
CMRNT non-tidal combined atmosphere and ocean geopotential coefficients averaged over certain time period
EARTH 0.3986004415E+15 0.6378136460E+07
SHM 100 100 0.00 fully normalized not applicable
GRCOF2 0 0 -0.583698412111E-10 0.000000000000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 1 0 0.209292841438E-09 0.000000000000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 1 1 0.122057021278E-09 0.248675512625E-09 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 2 0 0.147614933502E-09 0.000000000000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 2 1 0.781755413718E-11 0.121554166716E-09 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 2 2 -0.223569283429E-10 0.113747173353E-10 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 3 0 -0.805938749435E-10 0.000000000000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 3 1 0.444049248116E-10 0.114265131123E-09 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 3 2 -0.178448449003E-10 0.111855256212E-10 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 3 3 -0.484816559819E-11 -0.236733027389E-10 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 4 0 0.437068432377E-10 0.000000000000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 4 1 0.328412163590E-11 0.598910781185E-10 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 4 2 -0.373900166663E-11 0.208312749393E-10 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 4 3 0.675081277346E-11 0.289228393055E-10 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 4 4 0.461389074242E-11 0.614363804660E-11 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 5 0 -0.138718355996E-10 0.000000000000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 5 1 -0.102436790250E-10 0.654006483315E-10 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 5 2 -0.87776222282E-11 0.140426044347E-10 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 5 3 -0.191996733674E-10 -0.683216290822E-11 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 5 4 -0.143430513225E-10 0.903984111549E-11 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 5 5 -0.748216766515E-11 -0.670147188454E-11 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 6 0 0.190356355085E-10 0.000000000000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 6 1 -0.146898398969E-10 0.271517462523E-10 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 6 2 -0.107157483895E-10 -0.748932866140E-11 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 6 3 -0.123002604464E-11 0.175687275454E-10 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 6 4 -0.464094503073E-11 0.646312095321E-11 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn
GRCOF2 6 5 -0.605088771656E-11 -0.104814296327E-10 0.0000E+00 0.0000E+00 20060101.0000 20060201.0000 nnnn

```

Figura 5 Ejemplo de un archivo GAC

El archivo de la Figura 5 se puede describir como:

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

- **FIRST:** Primer línea que indica el nombre del archivo, el centro que genera el archivo y la fecha en la que se genera el archivo.
- **CMMNT:** Segunda línea, texto libre que indica algún comentario sobre el archivo o su contenido
- **EARTH:** Tercera línea, indica las constantes gravitacionales de masa de la Tierra
- **SHM:** Cuarta línea, indica el máximo grado y orden del modelo, así como el factor de escala aplicada a la desviación estándar de cada coeficiente (si la escala es igual a 0, no se cuenta con desviación estándar)
- **GRCOF2:** Quinta línea – final del archivo, de los coeficientes indica el grado, orden, coeficiente Clm, coeficiente SIm, desviación estándar de Clm, desviación estándar de SIm, época de inicio, época final de procesado y si se ajustaron los coeficientes (yy o nn) o si se cuenta con información estocástica a priori de los coeficientes (yy o nn)

Función efectiva de cuenca y TWE (Total Water Estimation)

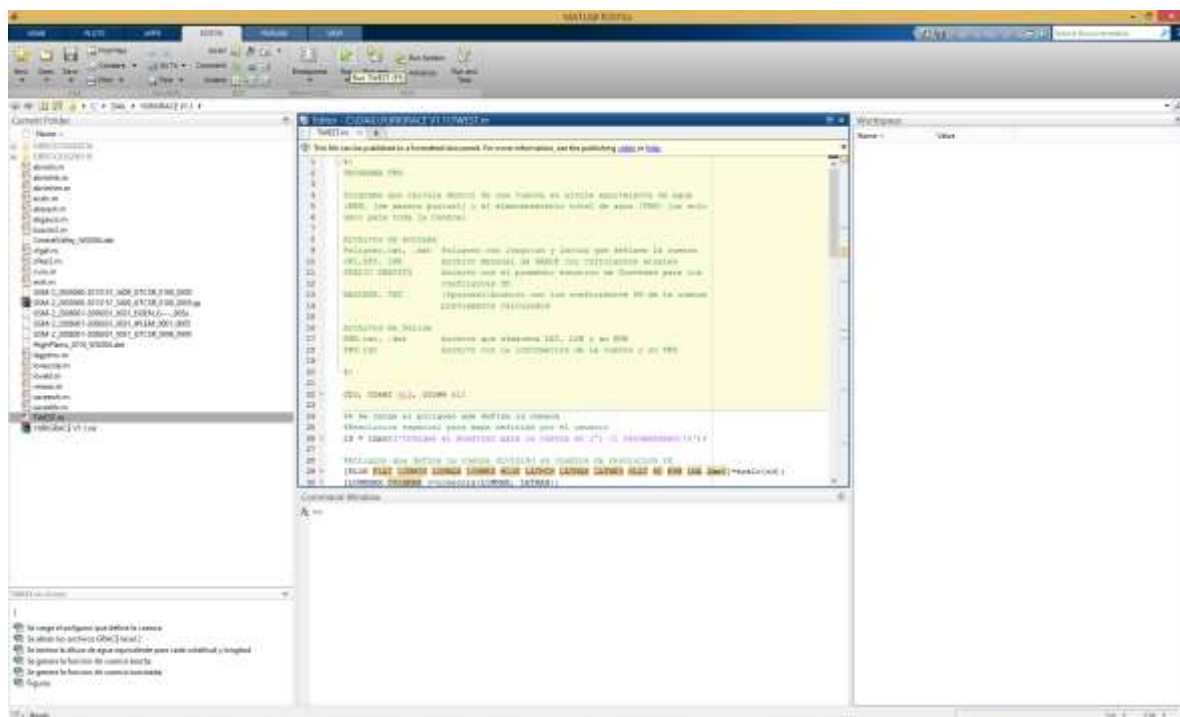
En el capítulo de Metodología general de productos GRACE (C.- Delimitación de la cuenca y/u obtención de la función de cuenca efectiva) se comentó la parte teórica del proyecto en estudio, por lo que en este capítulo se pondrá en práctica con ayuda del software MATLAB el filtrado de los datos GRACE L-2. Tomando en cuenta la bibliografía preexistente (Famiglietti et.al., 2011, Scanlon et.al., 2012), se decidió realizar un ejercicio comparativo de la cuenca de Central Valley ubicada en los Estados Unidos, esto con el fin de hacer una estimación del error entre los datos publicados y los de este estudio.

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

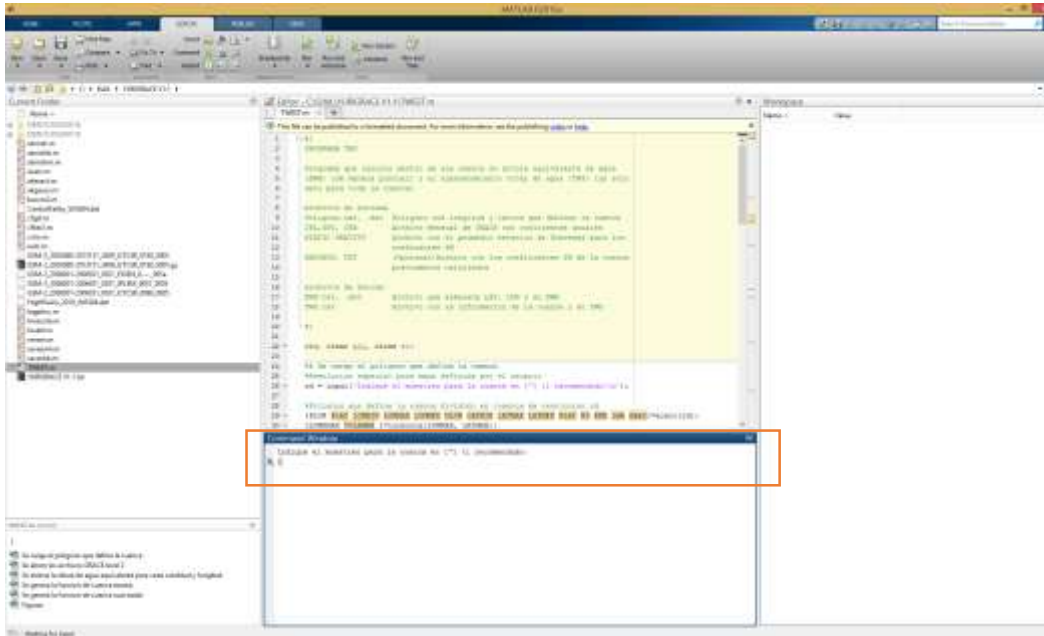
A continuación se explica paso a paso el primer ejercicio realizado con los datos del GFZ para el año de 2006 y posteriormente para el JPL y CSR del mismo año.

Laboratorio GFZ

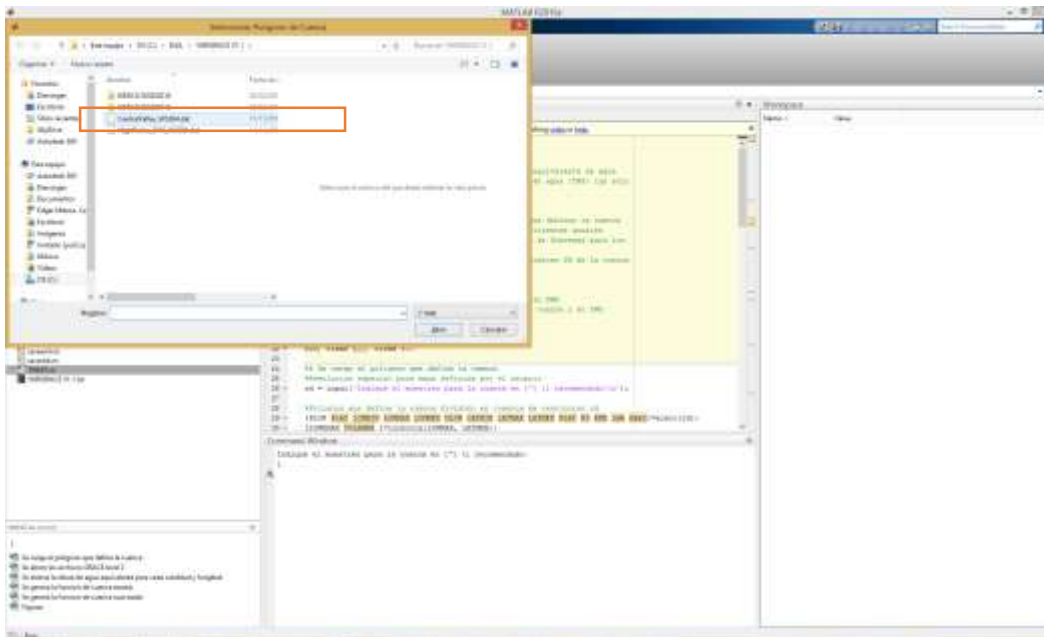


ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1



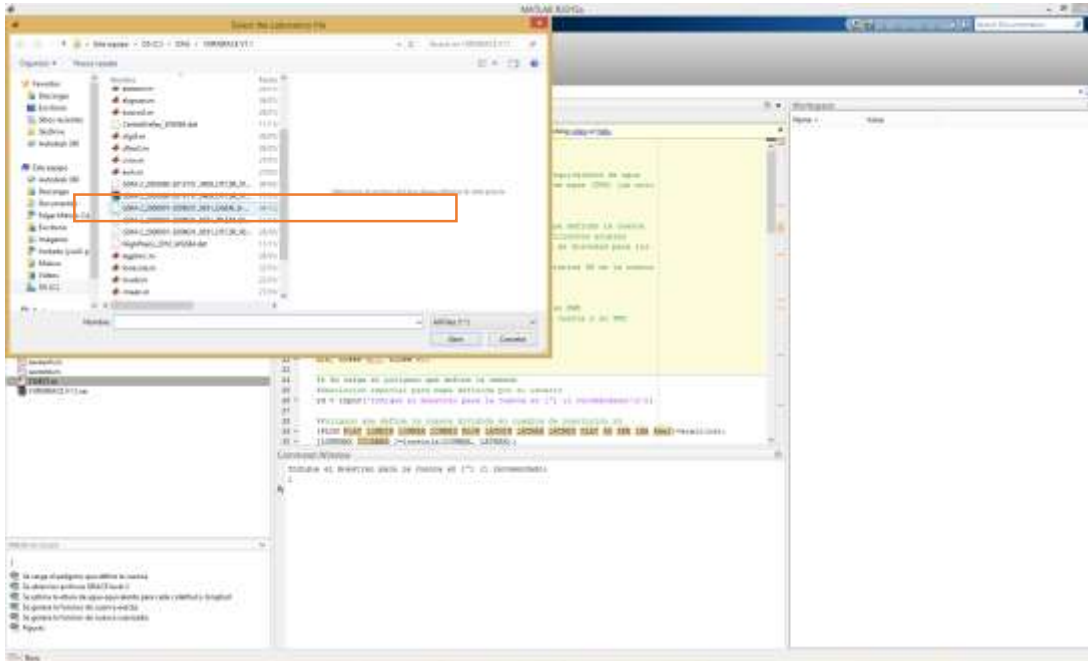
Se carga el polígono que define la cuenca, en este caso tomamos CentralValley_WGS84.dat.



ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

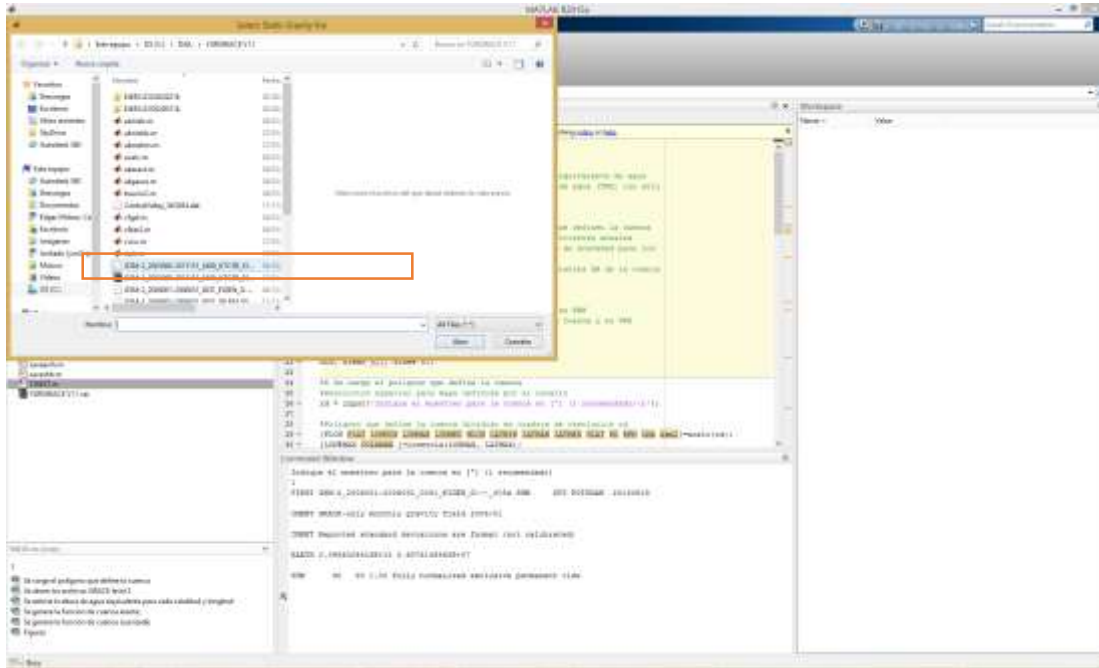
Después se pide cargar el archivo GSM que contiene los datos del GRACE, por lo que seleccionamos (GSM-2_2006001-2006031_0031_EIGEN_G---_005a), filtrado por el GFZ.



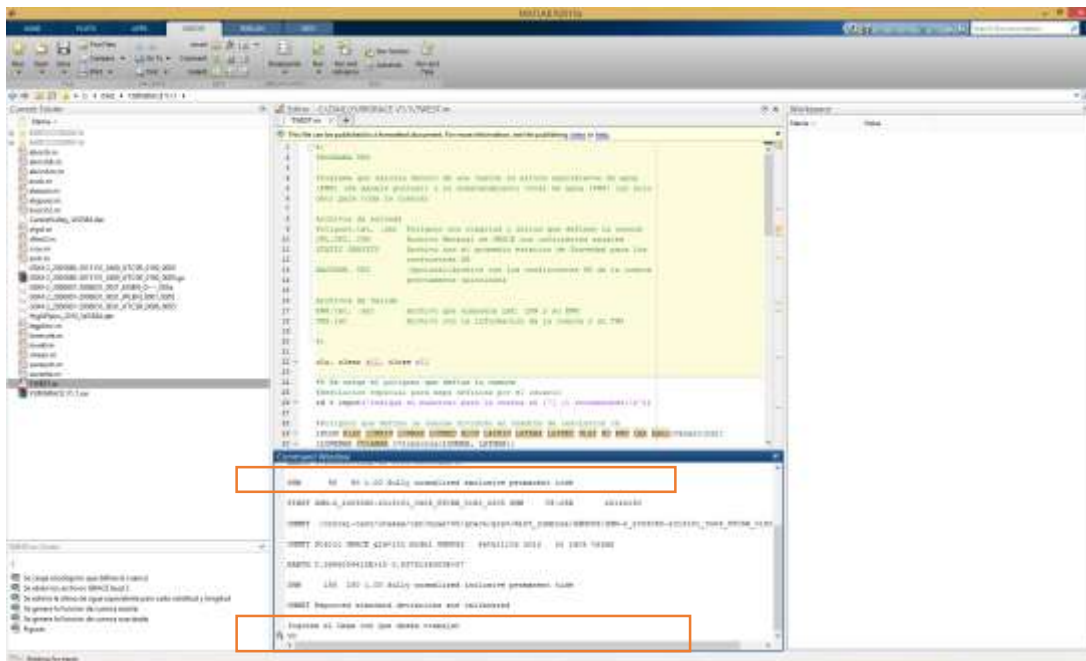
Inmediatamente se requiere seleccionar el archivo que contiene los promedios de gravedad estática de los años de la misión en curso (GSM-2_2003060-2013151_3409_UTCSR_0180_0005)

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1



Ahora el programa pide al usuario ingresar el Lmax que será de 90 como lo tiene el laboratorio con su número máximo de SH.

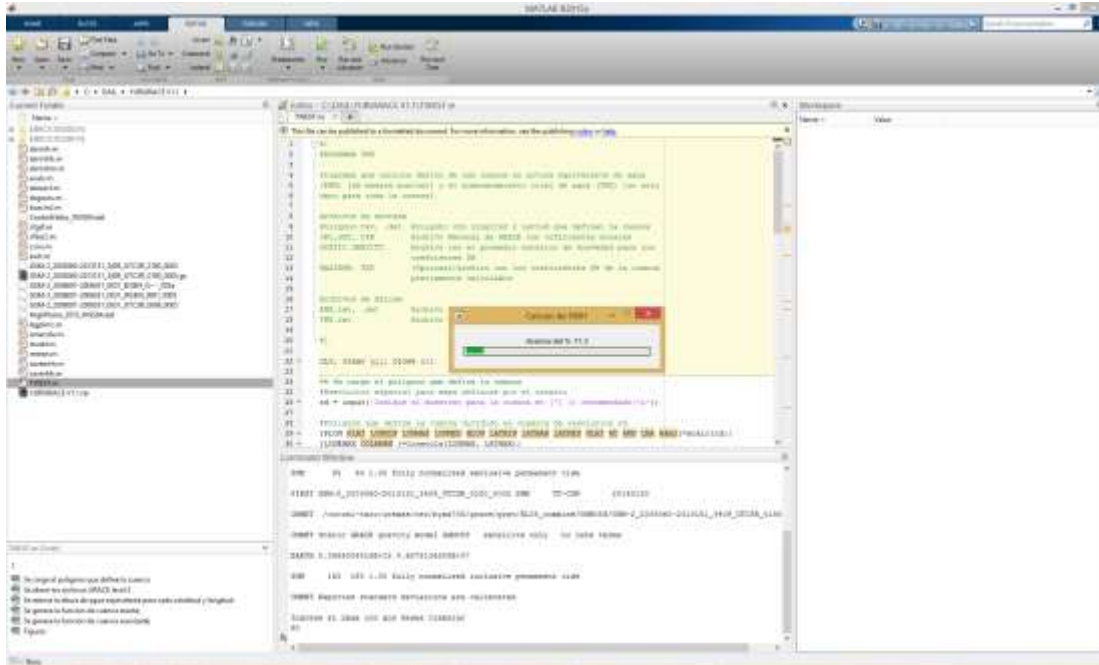


ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

Tiempo que tarda en calcular el EHW

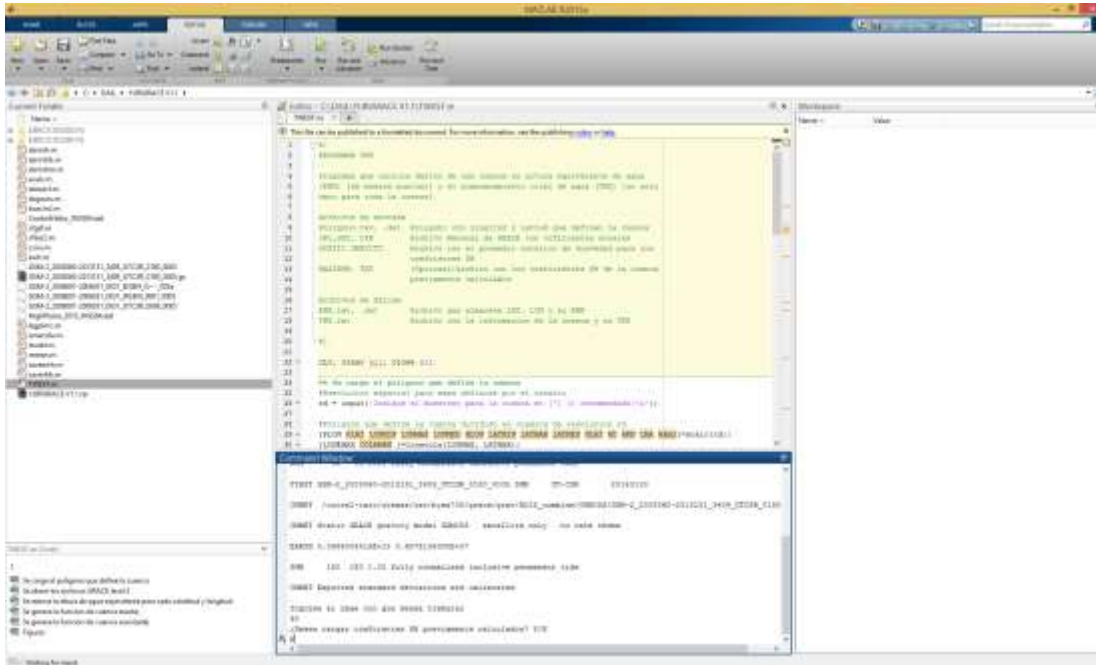
El usuario puede elegir nombre y lugar donde desea guardar los datos generados de EHW.



El siguiente paso es cargar los coeficientes SH previamente calculados, como no tenemos dato alguno, seleccionamos N, para que el programa los genere

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

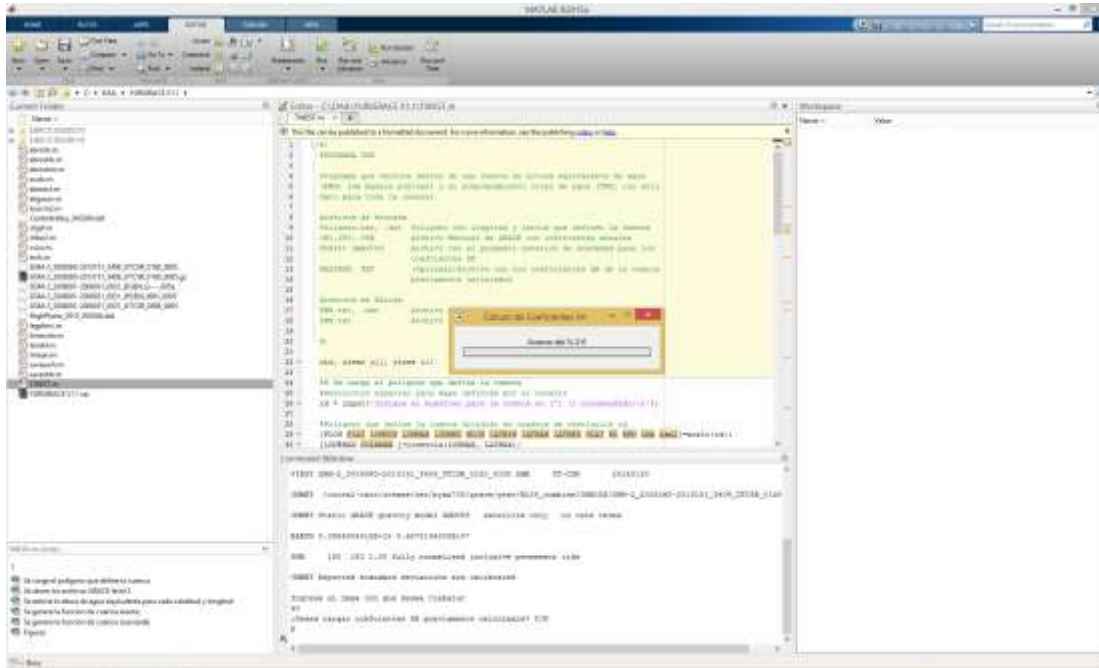
PROYECTO TH1503.1



Tiempo de espera para el cálculo de coeficientes. Se almacenan los coeficientes de cuenca generados

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1



Para el siguiente paso se necesita saber el radio medio para realizar el suavizado de datos

Se ingresa el valor y tarda unos segundos en calcular los resultados.

Se observa en la pantalla de comandos el resultado promedio del TWE el cual se debe copiar y guardar en el archivo EWH.txt ya que tanto los valores ahí generados y el promedio calculado que copiamos son los datos importantes de este programa ejecutado, se procede (si el usuario desea) dar click en -File-SaveAs- y se guarda la imagen de cuenta con nombre, formato y dirección deseados (Figura 6 Ejemplo GFZ).

PROYECTO TH1503.1

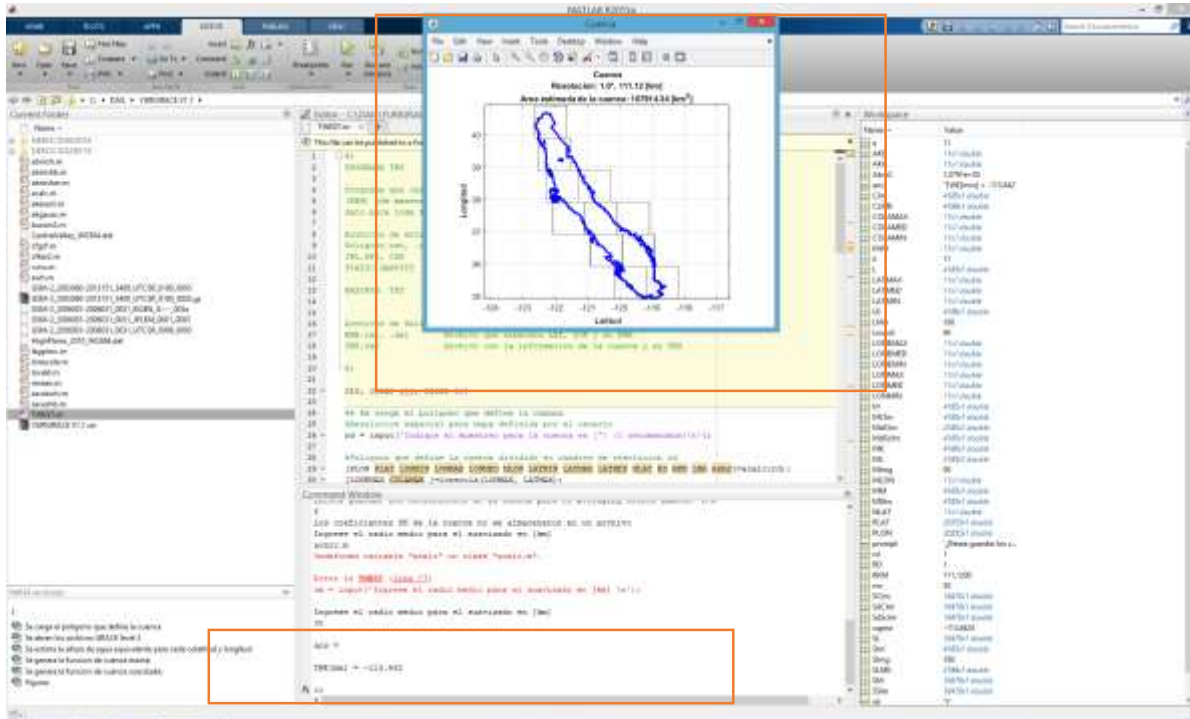


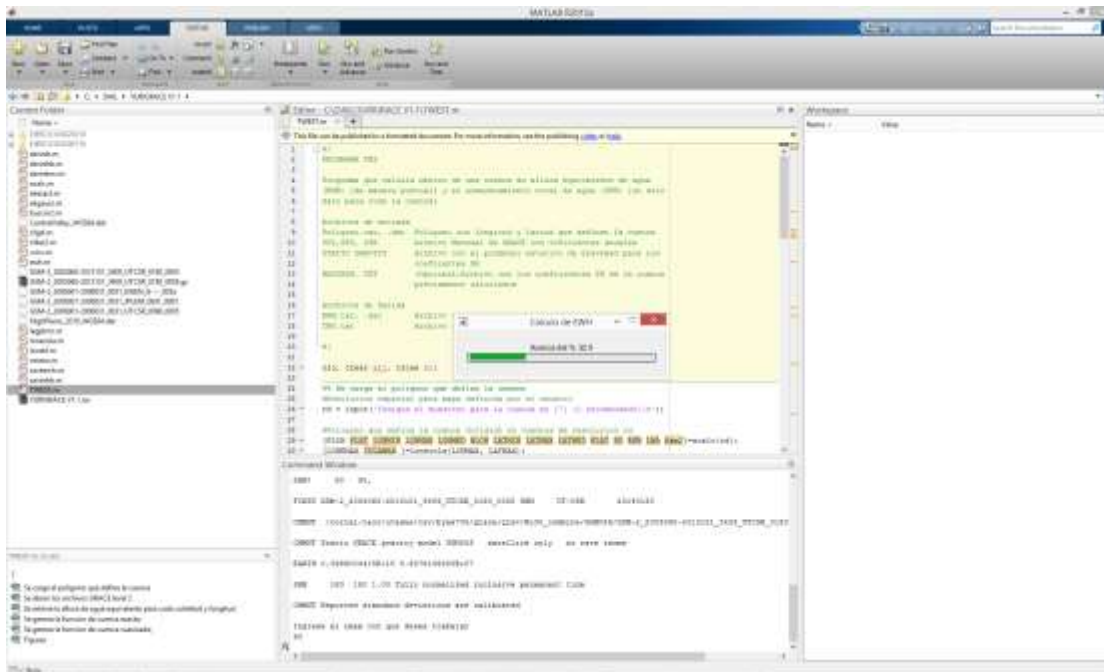
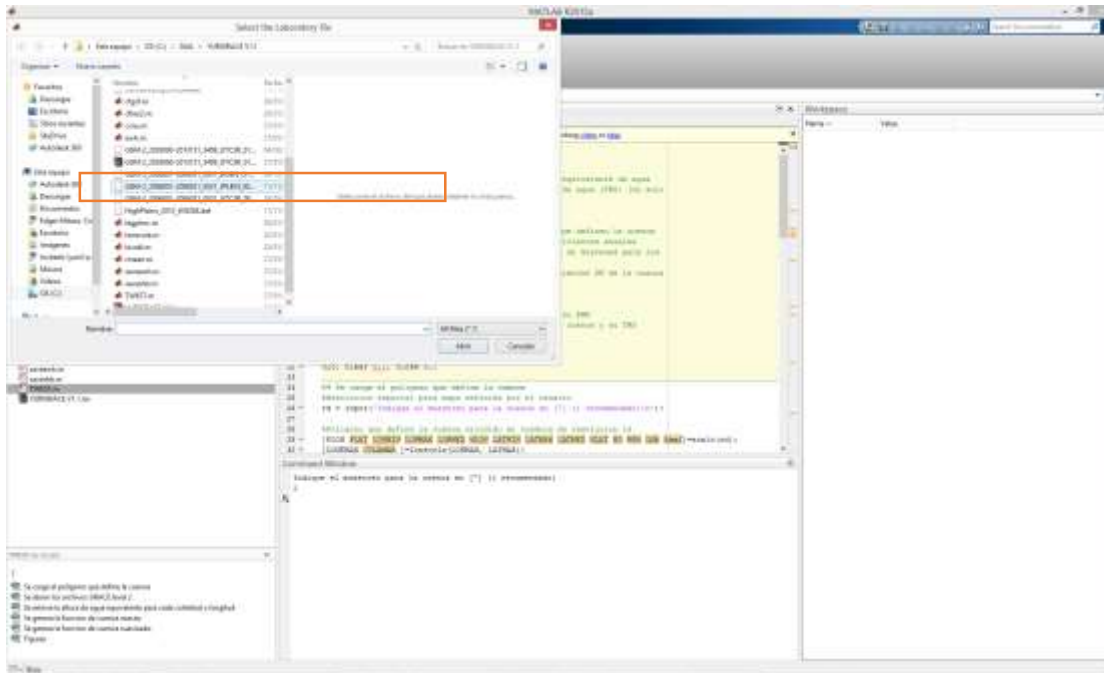
Figura 6 Ejemplo GFZ

Laboratorio JPL

Se repite el mismo procedimiento de abrir y ejecutar el programa, pero ahora se selecciona el archivo (GSM-2_2006001-2006031_0031_JPLEM_0001_0005) del JPL

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1



ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

Se realizan los mismos pasos descritos anteriormente y se observa el promedio del TWE (Figura 7 Ejemplo JPL).

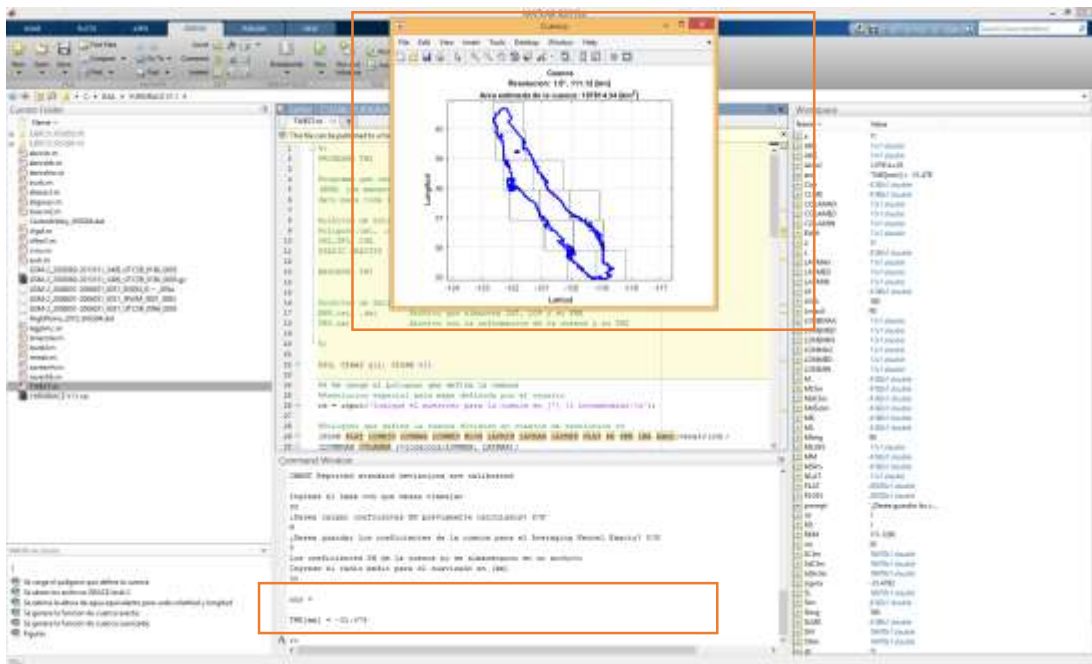


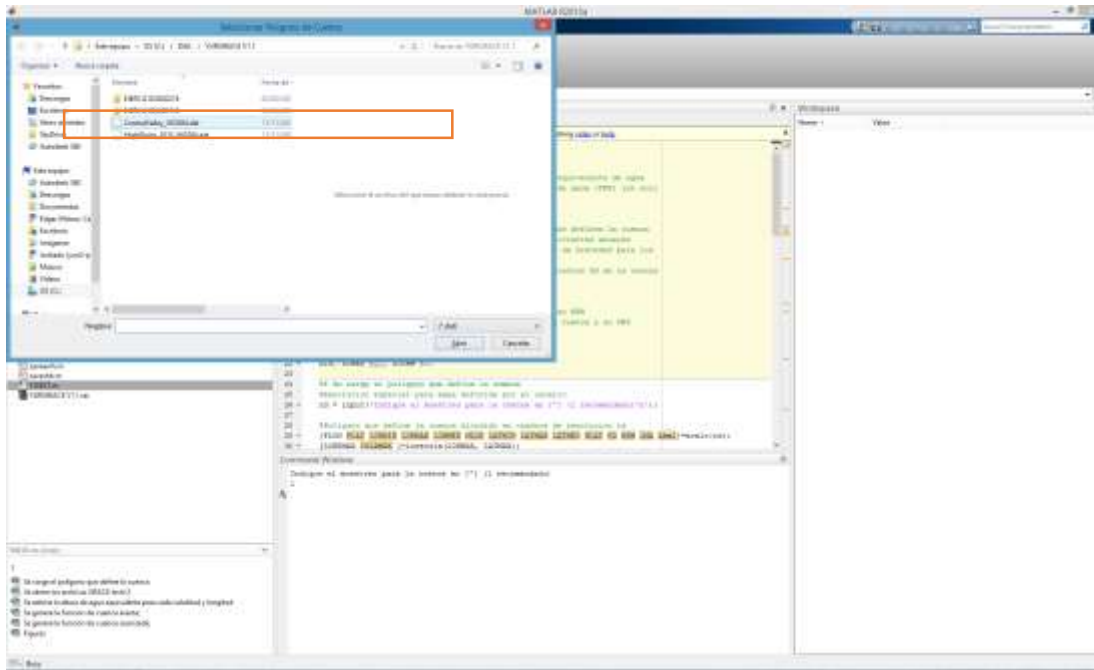
Figura 7 Ejemplo JPL

Laboratorio CSR

Se procede a evaluar el programa con los datos del tercer laboratorio (CSR), siguiendo la misma frecuencia del ejercicio

Se siguen las instrucciones del primer procedimiento y se obtienen los resultados (Figura 8 Ejemplo CSR).

PROYECTO TH1503.1



PROYECTO TH1503.1

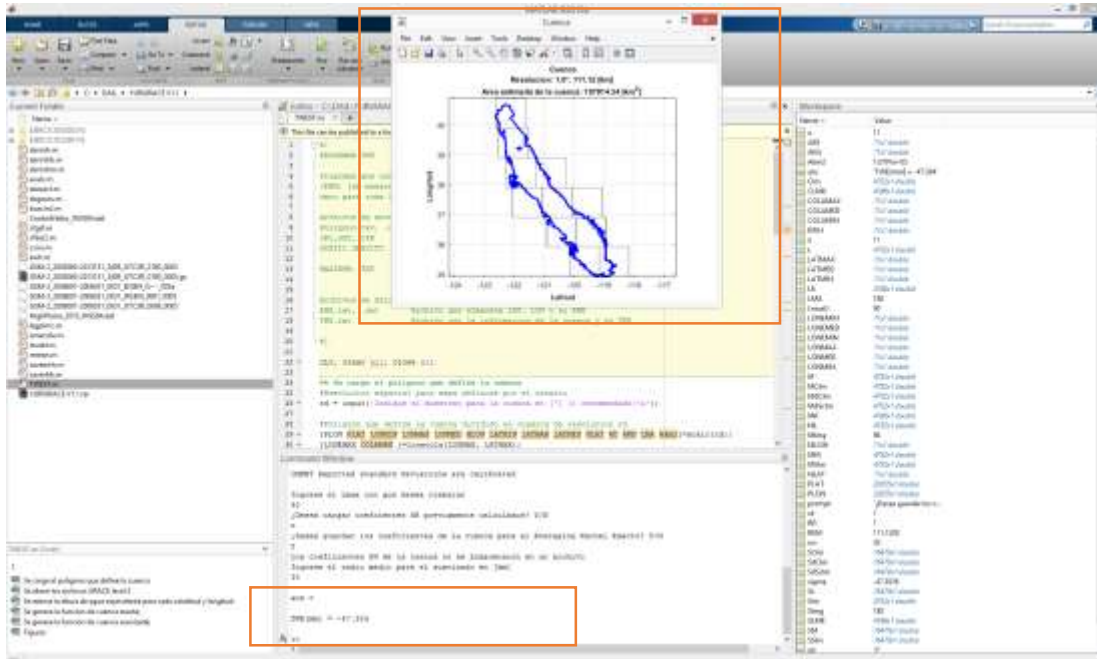


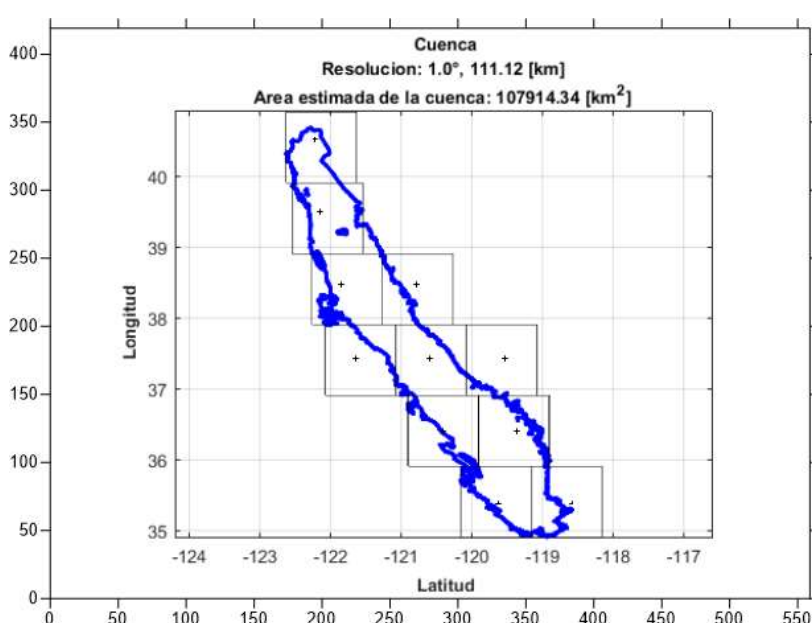
Figura 8 Ejemplo CSR

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

CAPÍTULO III “ESTIMACIÓN DEL ERROR”

La Altura Equivalente de Agua (EWH) es igual a la sumatoria puntual (Figura 9) del agua superficial + suelo + agua subterránea, por lo que el Total de Agua Estimada (TWE) es el promedio de esta altura proyectada en milímetros y conforme al mallado efectuado por los armónicos esféricos (SH), estos resultados para el año de 2006 son graficados a continuación (Figura 10);



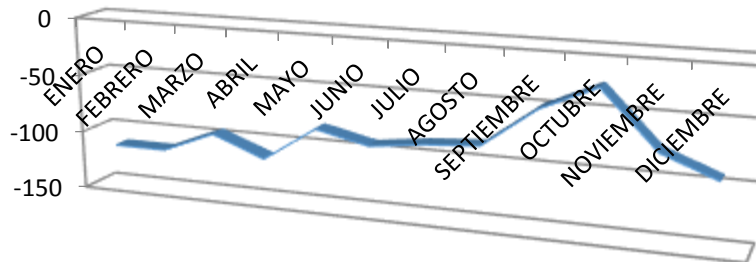
| 2006 | TWE |
|------------|---------|
| ENERO | -47.304 |
| FEBRERO | -43.196 |
| MARZO | -67.351 |
| ABRIL | -63.246 |
| MAYO | -41.446 |
| JUNIO | -30.087 |
| JULIO | -25.178 |
| AGOSTO | -18.575 |
| SEPTIEMBRE | -16.675 |
| OCTUBRE | 0.277 |
| NOVIEMBRE | -4.096 |
| DICIEMBRE | -25.154 |

Figura 9 Delimitación de cuenca Central Valley y ubicación de puntos promedio

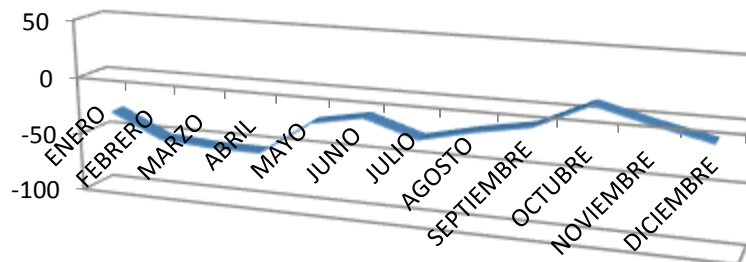
ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

GFZ(2006)



JPL(2006)



ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

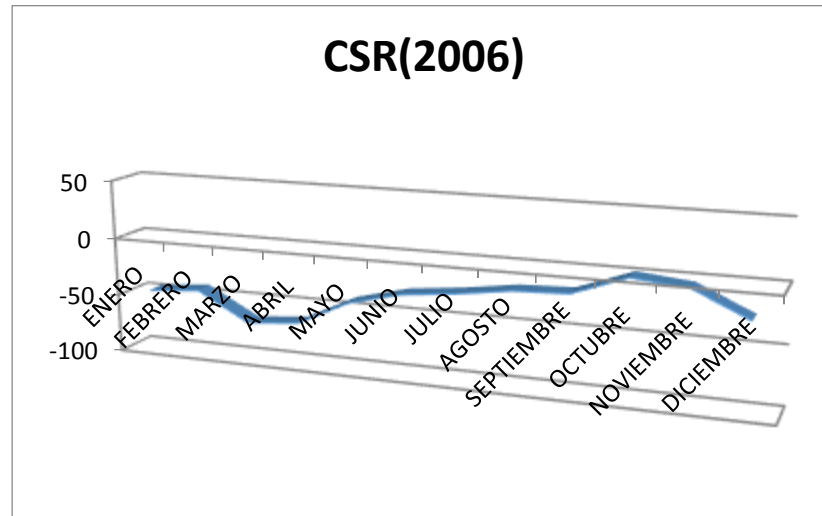


Figura 10 Total de Agua Estimada para el año 2006

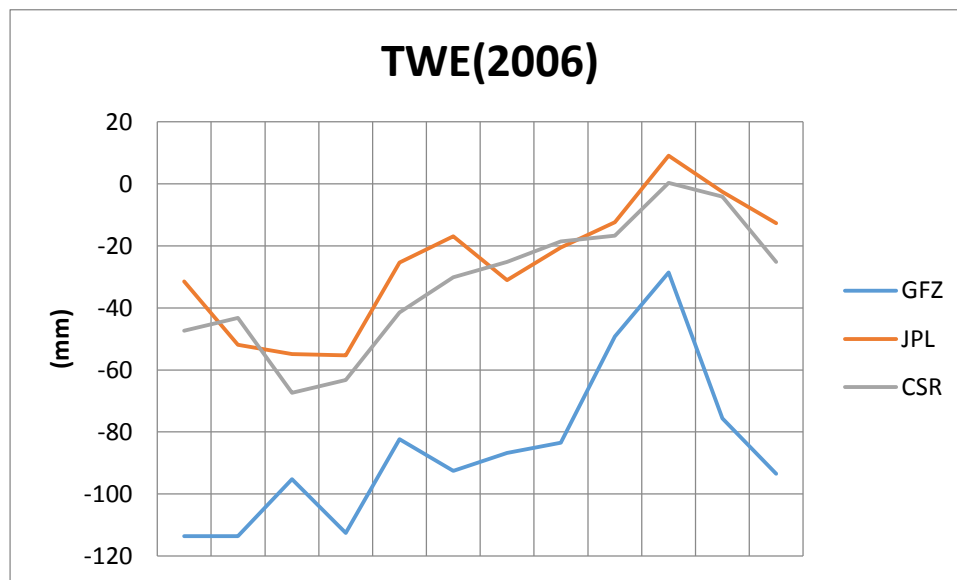


Figura 11 Comportamiento de estimaciones

En la Figura 11 se observa el comportamiento que presentan los resultados obtenidos del filtrado de los tres laboratorios para el año 2006, por lo que podemos interpretar que entre el

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

CSR y JPL existe un mayor suavizado de los datos en comparación con el GFZ, además de la amplia variación numérica del GFZ y los otros dos laboratorios.

En cuestión de tendencia, se observa cierto comportamiento similar para los tres laboratorios en algunos meses, por lo que falta comparar respecto a más años y continuar analizando la función de cuenca para una estimación del error próxima a cero.

GRACE Tellus en el norte de la República Mexicana y su variación milímetro/tiempo para Hermosillo Sonora

2002

CSR

Fue el primer año en que el experimento GRACE tomó las primeras mediciones, estos datos muestran que, para el norte de la república mexicana, abril fue el primer mes con un mínimo de -7 y un máximo de 3, todos los resultados aquí planteados son en milímetros de la medición vertical de la sumatoria del agua superficial + humedad del suelo+ hielo+ agua subterránea. Mayo obtuvo un mínimo de -5.8 y un máximo de 0.4, agosto por su parte tuvo valores mínimos de -2.8 y máximos de 0.6, septiembre muestra valores mínimos de -4.7 y máximos de 1.5, octubre valores mínimos de -4.5 y máximos de 3.5, noviembre mínimo de -2.8 y máximo de 2.4, diciembre valores mínimos de -2.4 y máximos de 1.8. Por lo que se puede observar que después de la temporada de sequía los valores permanecieron constantes en la zona centro y algunas ligeras variaciones en el norte y centro.

GFZ

Abril y mayo se observan en su totalidad con valores negativos considerables, fue a partir de Agosto donde el rango de valores mejora y se ve reflejado para el resto del año con un rango de -4 a 2, teniendo algunas variaciones en el norte y centro.

JPL

Como se describió en los otros dos laboratorios, para este caso las variaciones son muy similares, abril y mayo en su totalidad con números negativos, lo que resta del año se observan valores que oscilan entre los 3 y los -3 con una agrupación aleatoria de las variaciones.

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

Ensamble

El ensamblado de los datos GRACE se presenta a continuación para todos los años realizando un promedio de los tres laboratorios con el fin de comprender los resultados obtenidos por el experimento satelital. En este año, los primeros meses se observan datos negativos en la mayoría del área en estudio, es en agosto donde los datos neutros aparecen y se mantienen hasta el final del año, con una variación a valores negativos en dirección norte para septiembre y octubre, y central para noviembre y diciembre.

2003

CSR

Este año se puede interpretar que de enero a septiembre permaneció seco en la gran parte del área en estudio, mejorando las condiciones hidrológicas al final del año en especial un aumento en el volumen de agua al noreste y este de la república.

GFZ

Al igual que el laboratorio anterior, los valores negativos predominan de enero a septiembre con excepción de enero y abril, los cuales tienen una pequeña zona con valores neutros en el noroeste y este respectivamente, de septiembre a diciembre el volumen de agua aumenta de centro a norte gradualmente.

JPL

Para este laboratorio se puede interpretar enero como un mes de muchos contrastes, una parte norte con valores positivos de gran rango y debajo de ellos una anomalía de valores negativos muy pronunciados, todos ellos del lado oeste y decrecientes con dirección este. Febrero y marzo con resultados neutros con tendencias negativas de norte a centro, de abril hasta agosto los valores negativos son preponderantes, lo que resta del año mejora la situación de centro a norte con valores positivos.

Ensamble

Con el procesado de la información se observa un mes de enero con volúmenes positivos en la parte noroeste y valores negativos en la parte centro, seguido con un febrero con valores neutros y negativos en su mayoría siguiendo la

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

misma tendencia del mes anterior, marzo y abril presentan cierta similitud de oeste a este con valores de neutros a negativos, los meses siguientes y hasta el mes de septiembre se observan datos negativos en la totalidad del territorio, por ultimo de octubre a diciembre las condiciones mejoran con un aumento de agua en la zona centro y de forma decreciente hacia el norte.

2004

CSR

La última tendencia del año pasado es observable a principios de este, donde de abril a julio se presenta la época de sequía con mayor intensidad en las zonas de Baja California, Sonora y Chihuahua, para cerrar el semestre con una considerable ganancia de agua en las parte centro y noreste.

GFZ

Este año inicia con valores neutros y positivos concentrándose los menores datos en Baja California y partes cercanas al golfo de California, en mayo, junio y julio los rangos negativos mayores a -7 siguen una secuencia de oeste a este, para el final del semestre se nota un aumento de la columna de agua en las zonas cercanas al pacífico y al noreste, finalmente las partes neutras son para la zona de Chihuahua y Sonora.

JPL

Los resultados aquí mapeados demuestran los primeros meses del año con valores aproximados de 2 a -2 siguiendo una graduación este oeste, de abril a julio se presenta esa misma variación pero de valores negativos a neutros, de agosto a octubre el flujo de aumento del volumen de agua es de centro a norte y finalmente en noviembre y diciembre la variación es de norte a centro.

Ensamble

De enero a marzo las variaciones siguen un comportamiento parecido de menor a mayor con dirección oeste este, de mayo a julio la dirección de variación cambia de sentido observándose valores negativos considerables, las condiciones en los meses siguientes mejoran gradualmente de neutro a valores positivos y los últimos dos meses del año las mayores concentraciones se aprecian en la parte este del país.

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

2005

CSR

Este año arroja resultados positivos en comparación a los años antes vistos, desde principios de año y hasta abril, se observa una importante cantidad de agua en la mayor parte del norte del país, siguiendo una afluencia de norte a sur. Mayo y junio se aprecian con sequías parciales en la zona centro y oeste, para la otra parte del semestre se observa un descenso periódico en los valores a nivel global llegando a diciembre con sequía.

GFZ

De enero hasta abril los valores positivos de la columna de agua son de gran importancia con un descenso de norte a sur, de mayo a junio se observan sequías parciales con un aumento de igual manera de norte a sur, lo que queda del año el cambio en la variación de agua es de oeste a este con rangos entre 2 a -2 hasta noviembre y diciembre, donde los valores negativos importantes reaparecen de este a oeste.

JPL

Los primeros meses del año se aprecian valores positivos con una tendencia decreciente de norte a centro, es en mayo donde las cosas cambian, la época de sequía se ve reflejada ahora de centro a norte hasta el mes de julio, de agosto a octubre los volúmenes de agua son neutros con cierta tendencia positiva en la parte de Sinaloa y Baja California, en tanto los últimos dos meses del año se analiza un periodo de sequía tomando como base valores neutros a negativos.

Ensamble

Al igual que los resultados de los laboratorios, de enero hasta abril las condiciones hidrológicas son positivas de forma decreciente en dirección centro, de mayo a julio los datos son apreciables de negativos a neutros, de agosto a septiembre las condiciones son similares con rubros neutros para concluir con un noviembre y diciembre con valores negativos en la parte este.

2006

CSR

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

Las sequías continúan los primeros 6 meses del año, a partir de Agosto las variaciones en el volumen total de agua mejoran de oeste a este y viceversa, interpretando una mejora en las condiciones de Baja California.

GFZ

De enero a julio el descenso en la columna de agua es fuertemente marcado en toda la república, de agosto a diciembre se aprecian valores neutros y positivos con excepción de agosto, noviembre y diciembre con principios de valores negativos de este a oeste.

JPL

A diferencia del laboratorio anterior, el descenso en la columna de agua es hasta junio, de julio a diciembre el comportamiento de la variación es casi similar, de mayor a menor en dirección oeste este, los meses de septiembre a noviembre son los que presentan valores positivos de mayor rango.

Ensamble

De mayo a junio se puede observar un comportamiento similar de valores negativos a neutros con dirección centro norte, de julio a diciembre el comportamiento es diferente (positivo a neutro) con valores de este a oeste con octubre y noviembre como los mejores meses.

2007

CSR

El rango de valores para este año prevaleció constante con valores de -3.9 a 5.2, donde las zonas próximas al mar de cortés y al río bravo arrojaron los valores más altos.

GFZ

Se presenta la misma tendencia de valores que el laboratorio anterior, notando los meses de abril, mayo y junio como los de sequía, para después recuperarse las condiciones hidrológicas y disminuir ligeramente al final de año.

JPL

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

En los mapas se puede observar una similitud al primer laboratorio, donde prevaleció constante el rango de valores y con buenas condiciones hidrológicas para las zonas cercanas al Golfo de California y en los primeros seis meses para la parte noreste.

Ensamble

Para este ensamblado se puede interpretar como de manera paulatina enero y febrero tienen un comportamiento similar el cual varía para marzo hasta julio teniendo valores neutros y ligeramente negativos de norte a centro, es de septiembre a diciembre donde los valores vuelven a mejorar notando que las partes cercanas al mar de Cortés son las que presentan valores más altos.

2008

CSR

La tendencia del año pasado continuaba hasta Mayo, donde la época de sequía afectó gran parte del territorio hasta Junio, después las condiciones mejoraron con una concentración importante de agua de centro a norte en la época de lluvias, para concluir como inició el año, con rangos de -1.8 a 2.

GFZ

Para este año en comparación con el otro laboratorio, se puede observar un cambio drástico en los valores, ya que de enero a marzo se observan valores neutros e indicios de descenso del volumen de agua, es a partir de abril hasta julio y parte de agosto que los valores negativos son bastantes y muy marcados, de septiembre a octubre el volumen de agua aumenta de manera positiva en la parte centro y desciende conforme las isóneas avanzan al norte hasta diciembre, el cual retoma un rango de valores neutros a positivos.

JPL

Con tendencias similares al laboratorio anterior, los primeros meses del año se observan resultados neutros, es a partir de marzo cuando de forma gradual el descenso del volumen de agua ocurre de norte a centro, en julio y agosto la variación es de este a oeste, los últimos meses del año los rasgos cambian, aumenta el valor de la columna de agua del norte al centro.

Ensamble

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

De enero a marzo los valores neutros son distribuidos a lo largo del área en estudio, es a partir de abril donde el descenso en la columna de agua continua hasta junio, de julio a octubre el aumento es notable con valores máximos en la zona centro para concluir con los últimos meses que desciende el volumen, pero no tanto.

2009

CSR

Para este año las zonas con mayor sequia son aisladas y conservando un rango neutro alrededor del año, con lo que al final del mismo la parte centro y oeste del país son las que tienen valores positivos siempre decreciendo en dirección norte.

GFZ

Predominan los valores neutros a principios de año, las sequias continúan de abril a parte norte de agosto, donde la zona circundante al Golfo de California tiene un aumento positivo decreciente hacia la parte noreste, es hasta noviembre donde la variación en el volumen del agua tuvo esta tendencia, terminando diciembre con valores neutros.

JPL

Los valores neutros son preponderantes a principios de año, es en abril donde las concentraciones negativas aparecen y conforme avanza el año se distribuyen los valores negativos de relevancia en la parte norte cercana al rio bravo pero el resto del territorio estudiado presenta valores mayores a 3.4, observando de octubre a diciembre los datos más altos.

Ensamble

Se puede observar un 2009 en el que los tres primeros meses del año tienen valores neutros seguidos por un periodo de abril a junio con principios en la disminución de los resultados, logrando interpretar que para julio hasta septiembre la presencia de valores negativos en la parte norte del país es importante, para terminar los valores positivos en la zona oeste de octubre a diciembre sobresalen del rango analizado para este año.

2010

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

CSR

El volumen total de agua en este año arroja datos positivos en todo el periodo, con una tendencia de norte a centro a principios y viceversa para el final del año. Observando que en la parte norte existen datos que oscilan entre los -1.6.

GFZ

La información procesada por este laboratorio también demuestre que el año 2010 tuvo datos positivos importantes en casi todo el periodo, observando valores neutros y ligeramente negativos a mediados y finales de año.

JPL

En este año la presencia de valores positivos es apreciable en todo el periodo, caracterizando mayo como el mes con menos valores, fuera de eso, las acumulaciones norte centro a principios de año y centro norte al final son fácilmente observables.

Ensamble

Se puede observar una importante acumulación del volumen de agua para los primeros meses, seguido por un corto periodo de resultados neutros con excepción del mes de mayo, donde en la parte oeste se puede apreciar una disminución de la columna de agua, seguido por otra etapa de datos positivos para la mayoría del territorio hasta noviembre para cerrar con un diciembre de isolíneas cercanas al 0.

2011

CSR

Al contrario que el año pasado, en este se puede observar una etapa de sequía muy importante, enfocándonos en la zona de Sonora y la parte este, ya que las anomalías son apreciables a simple vista.

GFZ

De igual manera, la etapa de sequía es muy marcada, rangos negativos y neutros predominan en la mayoría del año de norte a centro y de este a oeste.

JPL

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

Aquí se puede observar un año muy diferente al anterior, principios de año con valores negativos y neutros de manera aleatoria y de agosto a diciembre con una tendencia noreste oeste.

Ensamble

En contraste con el año anterior, los datos negativos predominan la casi en todo el año, observando épocas fuertes en junio y partes de agosto hasta diciembre donde el foco del descenso es en la parte norte, octubre y noviembre se aprecian valores positivos para Baja California.

2012

CSR

Los datos negativos continúan para este año, notando como mejores meses Agosto y Septiembre, ya que se puede interpretar un aumento en el volumen de agua en las zonas cercanas al mar de cortés, fuera de eso, la gran mayoría del área en estudio sufrió de sequía.

GFZ

El descenso en el volumen de agua es apreciable en la mayoría del año, a diferencia del laboratorio anterior, de marzo a julio son los mejores meses con valores positivos en Baja California, en conclusión 2012 fue un año con variaciones negativas.

JPL

Los valores negativos continúan para la totalidad del año en la gran parte del territorio investigado, agosto y septiembre son los únicos meses con valores positivos en la parte de Baja California, Sonora y Sinaloa.

Ensamble

Este año continúa con lo mencionado en los laboratorios, valores bajos en el centro y noreste durante todo el año, encontrando valores neutros y un poco cercanos a los positivos para la parte de Baja California y Sinaloa.

2013

CSR

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD "GRACE" Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

Las sequias continuaron hasta Noviembre con valores mínimos de -9.3, donde toda la parte norte de la república fue afectada, ya para el final del año las condiciones mejoraron un poco, logrando neutralizándose los valores con excepción de las zonas cercanas a la frontera, ahí los valores negativos continuaron.

GFZ

A diferencia del laboratorio anterior, todo el año se observan datos negativos importantes, octubre, noviembre y diciembre presentan una muy ligera mejora de resultados en la zona centro.

JPL

El comportamiento hidrológico es similar al laboratorio anterior, se observa un año con bastantes valores negativos en la gran mayoría del territorio, julio, octubre, noviembre y diciembre son los meses con una mejora apreciable en su zona centro y Baja California.

Ensamble

Las concentraciones negativas son reflejadas en la gran parte del año, a partir de octubre el descenso de la columna de agua se ve concentrado en la zona norte y paulatinamente va mejorando la situación hacia el centro, teniendo valores aproximados de 3mm.

2014

CSR

Las sequias continuaron, siendo Baja California y Sinaloa las menos afectadas, fuera de ahí, se observan valores de hasta -9.1 en el mes de Mayo y Agosto.

GFZ

Los valores negativos predominan en la mayoría del año, con una tendencia descendente de norte a centro, localizando a Baja California y Sonora como las que tienen valores apenas sobresalientes del 0 de junio a noviembre.

JPL

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

Como se pudo observar con los dos laboratorios anteriores, los valores negativos continúan en la gran parte del año con una tendencia norte centro, enero, octubre y noviembre son los meses con valores un poco neutros y en ciertas zonas del centro y Baja California con valores positivos.

Ensamble

En este ensamblado se interpreta exactamente las mismas condiciones descritas en los laboratorios, un año con descensos importantes en la columna de agua al norte del país y unos niveles neutros y apenas sobresalientes del 0 para el centro, notando que Baja California Sur concentra los mayores datos

2015

CSR

Para este último año que se tiene registro hasta el momento, la variación hidrológica mejoró con lo que se venía presentando en los últimos años, la sequía en la parte norte continua, pero se aprecian valores con tendencia a 0 y positivos en el resto del área para los primeros meses.

GFZ

Aquí los primeros 4 meses se observan números negativos en la zona norte de la república y valores neutros y positivos para el resto del territorio.

JPL

Enero se aprecia con el mismo comportamiento del año pasado, es en febrero donde se observa una dualidad entre la parte de Baja California norte y el este de la república, el primero con valores positivos y el segundo isolíneas negativas. Los dos meses siguientes que se tienen mapeados presentan una condición hidrológica favorable con rangos de valores de 3 a 0.2.

Ensamble

Estos últimos cuatro meses son parecidos con un enero de valores negativos, un febrero con concentraciones positivas en Baja California norte, marzo y abril similares con un orden creciente de norte a centro mostrando valores positivos en Baja California y Tamaulipas.

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

CONCLUSIONES

Los datos GRACE Level-2 GSM, procesados independientemente por los distintos laboratorios, contienen los coeficientes SH que representan el campo gravitacional de la Tierra, de los cuales han sido removidos los efectos de las señales de masas oceánicas y atmosféricas. Los modelos de las contribuciones oceánicas y atmosféricas a los archivos GSM, se encuentran en los archivos GAC y GAD.

La señal dominante de los datos GRACE Level-2 reflejan cambios en el almacenamiento de agua verticalmente integrado, los cuales incluyen variaciones de las capas de nieve, áreas glaciales, agua superficial, humedad del suelo, y agua subterránea a todas las profundidades. Por lo que, extraer variaciones del almacenamiento de alguna componente en particular (e.g. agua subterránea) requiere descomponer la señal del almacenamiento de agua verticalmente integrando, ya sea por medio de asunciones (e.g. ignorando la contribución de nieve o agua superficial) o bien empleando modelos e información a priori, disponibles bases de datos como SNODAS, GLDAS, NLDAS.

Las estimaciones de EWH y TWS son variaciones a lo largo del tiempo y que la amplitud del cambio será en función del valor promedio (valor estático) del que se parta. En el caso del programa se empleó como valor promedio el modelo estático de GRACE GGM05S, estimado desde febrero de 2003 a mayo de 2013.

En el caso del TWS es necesario estimar los valores de “leakage” y “bias”, los cuales nos indican: Errores causados por la forma de la Función de Cuenca estimada, número de coeficientes empleados (Lmax) al momento de realizar los cálculos, y contaminación por cuencas o zonas de almacenamiento circundantes al área de estudio.

Se emplearon 60 y 50 armónicos SH para los datos CSR y GRGS

Se aplicó un filtro de “destriping” en los datos CSR.

Se aplicó un filtro Gaussiano con radio medio de 300 [km] a los datos CSR.

Debido al filtrado (que atenúa la amplitud) es necesario restaurar la amplitud señal original. Esta parte involucra estimar un factor de multiplicación o re escalamiento, el cual se obtiene al aplicar el mismo proceso que a los datos de

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

GRACE pero a una distribución de masa sintética (Modelado directo de la cuenca), a partir de la cual se calcula la relación entre datos filtrados y no filtrados, siendo esta última el factor buscado. (Ya que implica el modelado a partir de datos sintéticos e información de las bases de datos GLDAS, LSMs.

Correcciones de “Leakage” y “Bias”. Estos efectos se corrigen por medio de modelos e información a priori proveniente principalmente de NLDAS, SNODAS y GLDAS. (Ya que implica el modelado a partir de datos sintéticos e información de las bases de datos NLDAS, SNODAS.

Una vez restaurada la señal del TWS, los componentes de balance de agua, que incluyen SWES, RESS y SMS promedios de la cuenca, son sustraídos de TWS obteniendo como residual el ΔGWS .

REFERENCIAS

Case K., G. Kruizinga and S.-C. Wu, 2010, GRACE Level 1B Data Product User Handbook: Jet Propulsion Laboratory

Famiglietti J.S., Lo M., Bethune J., Anderson K.J., Syed T.H., Swenson S.C., de Linage C.R. and Rodell M., Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California’s Central Valley, 2011, Geophysical Research Letters, vol. 38, doi: [10.1029/2010GL046442](https://doi.org/10.1029/2010GL046442)

Longuevergne L., B.R. Scanlon and C.R. Wilson, 2010, GRACE Hydrological estimates for small basins: Evaluating processing approaches on the High Plains Aquifer, USA: Water Resources Research, 46(11), W11517, doi: [10.1029/2009WR008564](https://doi.org/10.1029/2009WR008564)

Sakumura C., S. Bettadpur and S. Bruinsma, 2014. Ensemble prediction and intercomparison analysis of GRACE time-variable gravity field models. Geophysical Research Letters, 41(5), 1389-1397, doi: [10.1002/2013GL058632](https://doi.org/10.1002/2013GL058632)

Scanlon B.R., Longuevergne L., Long D., Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA. 2012, Water Resources Research, vol. 48, doi: [10.1029/2011WR011312](https://doi.org/10.1029/2011WR011312)

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

Swenson S., and J. Wahr, 2002, Methods for inferring regional surface-mass anomalies from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) measurements of time-variable gravity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 107(B9), ETG-3, doi: [10.1029/2001JB000576](https://doi.org/10.1029/2001JB000576)

Swenson S., J. Wahr and P.C.D. Milly, 2003, Estimated accuracies of regional water storage variations inferred from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE): *Water Resources Research*, 39(8), doi: [10.1029/2002WR001808](https://doi.org/10.1029/2002WR001808)

Syed T.H., J.S. Famiglietti, M. Rodell, J. Chen and C. R. Wilson (2008), Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS: *Water Resources Research*, 44(2), doi: [10.1029/2006WR005779](https://doi.org/10.1029/2006WR005779)

Tapley B.D., S. Bettadpur, J.C. Ries, P.F. Thompson and M.M. Watkins, 2004, GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System: *SCIENCE*, 305, 503-505, doi: [10.1126/science.1099192](https://doi.org/10.1126/science.1099192)

Wahr J., M. Molenaar and F. Bryan, 1998, Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B12), 30205-30229, doi: [10.1029/98JB02844](https://doi.org/10.1029/98JB02844)

Wahr J., S. Swenson, V. Zlotnicki and I. Velicogna, 2004, Time-variable gravity from GRACE: First results: *Geophysical Research Letters*, 31, L11501, doi: [10.1029/2004GL019779](https://doi.org/10.1029/2004GL019779)

Internet

Center for Space Research, University of TEXAS, SR Release-05 GRACE Level-2 Data Products Updated: 2015-04-07. <http://www.csr.utexas.edu/grace/RL05.html>

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

Anexo 1

GLOSARIO

| | |
|-------------------|--|
| CNES/GRGS | Centre National d'Etudes Spatiales/Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale |
| CU Boulder | University of Colorado Boulder |
| EWB | Equivalent Water Height |
| GFZ | GeoForschungsZentrum |
| GLDAS | Global Land Data Assimilation |
| GRACE | Gravity Recovery and Climate Experiment |
| GWS | Ground Water Storage |
| ICGEM | International Center for Global Gravity Fields Models |
| ISDC | Information System and Data Center |
| JPL | Jet Propulsion Laboratory |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| SDS | Science Data System |
| TWS | Total Water Storage |
| UTCSR | University of Texas Center for Space Research |

Campo gravitacional medio o campo gravitacional estático: Estimación a largo plazo del modelo gravitacional terrestre. Para este tipo de modelo se emplea una

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES
GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

expansión por medio de coeficientes de armónicos esféricos estimados a un orden y grado ≥ 160 .

De-aliasing: Corrección de los datos Level 1-B para influencias bien reconocidas, tales como redistribución de masas atmosféricas, redistribución de masas oceánicas debido a corrientes y vientos, mareas sólidas y mareas oceánicas. Dichas correcciones se estiman a partir de modelos oceánicos, terrestres, climatológicos y su asociación a variaciones de masas

Destriping: Un filtro destriping (optimizado para las zonas oceánicas y diferente de la destriping tierra) se aplica a los datos para minimizar el efecto de un error cuya señal delatora son rayas N-S en mapas mensuales GRACE.

Leakage: Cambios en el almacenamiento de agua fuera de la geometría de la cuenca, debidos a que al momento de generar una función de cuenca trunca, esta deja de ser cero fuera de la geometría de la misma

Tendencia: Diferencia entre el almacenamiento de agua ideal dentro de la cuenca y el estimado a partir de los coeficientes SH

Anexo 2

ECUACIONES

Ecuación G01. Cambios en una masa superficial por medio de una expansión de coeficientes armónicos esféricos

Las variaciones en el campo gravitacional terrestre en función del tiempo representan cambios en la distribución de masa a lo largo del globo; dichas variaciones pueden representarse como variaciones en una masa superficial y se obtienen por medio de (Wahr et al, 1998):

$$\Delta\sigma(\theta, \phi) = a_e \rho_w \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \tilde{P}_{lm}(\cos\theta) (\Delta\tilde{C}_{lm} \cos(m\phi) + \Delta\tilde{S}_{lm} \sin(m\phi))$$

Donde:

a = Radio de la Tierra

ρ_w = densidad del agua

θ = Colatitud

ϕ = Longitud este

\tilde{P}_{lm} = Función de Legendre asociada y normalizada

ESCALAMIENTO DE LAS LECTURAS DE GRAVEDAD “GRACE” Y SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE VARIABLES GEOHIDROLÓGICAS

PROYECTO TH1503.1

$$\tilde{P}_{lm}(x) = \sqrt{(2 - \delta_{m0})(2l + 1)} \frac{(l - m)!}{(l + m)!} \times \frac{(1 - x^2)^{\frac{m}{2}}}{2^l l!} \frac{d^{l+m}}{dx^{l+m}} (x^2 - 1)^l$$

Dicho cambio en la masa superficial se expresa en espesor equivalente de agua (EWH)

Ecuación G02. Resolución espacial de modelo gravimétrico en función de los coeficientes SH.

La resolución espacial del modelo gravimétrico generado a partir de la ecuación G01 está limitada por el grado (l) y orden (m) máximos (L_{max}) de los coeficientes SH disponibles y se expresa como (Longuevergne et al, 2010):

$$Resolucion\ espacial = \frac{\pi a}{L_{max}}$$

Donde:

a = Radio de la Tierra

L_{max} = l y m máximos disponibles

Ecuación G03. Función de cuenca h

La función de cuenca define una región de interés R con área R_0 y se define como:

$$h(X) = \begin{cases} 1 & \text{si } X \in R \\ 0 & \text{si } X \in \Omega - R \end{cases}$$

Donde:

$X = X(\theta, \varphi)$, posición en la superficie Terrestre

Ω = Superficie Terrestre

Ecuación G04. Estimación de almacenamiento de agua en función de los coeficientes SH

Una función de cuenca puede describirse en función de los coeficientes SH $h(X) \rightarrow (h_{l,m}^C \text{ y } h_{l,m}^S)$, por lo que la estimación de almacenamiento de agua puede expresarse como (Swenson et al, 2003):

$$\hat{S}_0 = \frac{4\pi a^3 \rho_e}{3R_0} \sum_{l=0}^{l_{max}} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} (C_{l,m} h_{l,m}^C + S_{l,m} h_{l,m}^S)$$

Donde:

\hat{S}_0 = Estimación del almacenamiento de agua

ρ_e = Densidad promedio de la Tierra

Ecuación G05. Tendencia, *Leakage* y Concentración

$$Tendencia = \frac{1}{R_0} \int_R S_0(h - \hat{h}) d\Omega \dots (a)$$

$$Leakage = \frac{1}{R_0} \int_{\Omega-R} S_{leak} \hat{h} d\Omega \dots (b)$$

$$Concentración = \Lambda = \frac{\int_R \hat{h}^2 d\Omega}{\int_{\Omega} \hat{h}^2 d\Omega} \dots (c)$$

PROYECTO TH1503.1

