



Actualización de las tendencias del nivel del mar en las costas de México

Informe técnico

Participantes:

Dra. Erika Danaé López-Espinoza, Investigadora del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático-Responsable

M. en C. Octavio Gómez Ramos, Jefe del Servicio Mareográfico Nacional del Instituto de Geofísica-Corresponsable

Colaboradores:

Ing. Miriam Arianna Zarza Alvarado, analista del Servicio Mareográfico Nacional

C. Felipe Hernández Maguey, analista del Servicio Mareográfico Nacional

Estudiantes:

Katia Hernández Sotelo, Licenciatura en Ciencias de la Tierra, UNAM

Karina Renó Domingos, Ingeniería Geomática, Universidad Federal Rural de Rio de Janeiro

Alejandro José Rocha Bermúdez, Ingeniería Geomática, Universidad de Costa Rica

Ana Laura López de los Santos. Ingeniería Geomática en la Facultad de Ingeniería de la UNAM

Vivaldo Garcia Perales. Ingeniería Geomática en la Facultad de Ingeniería de la UNAM

Sandra de la Cruz Garduño. Ingeniería Geomática en la Facultad de Ingeniería de la UNAM

CONTENIDO

1.	Introducción	2
1.1.	México y sus costas	4
2.	Objetivos	5
3.	Red de monitoreo del Servicio Mareográfico Nacional	5
4.	Metodología	7
5.	Resultados	12
6.	Conclusiones	17
7.	Resultados y productos derivados	18
8.	Referencias	19
	Apéndice A. Ejemplo del reporte manual generado para cada estación con información histórica	21
	Apéndice B. Programas desarrollados para la etapa 1 de la metodología propuesta de control de calidad de las mediciones de nivel del mar de la red del Servicio Mareográfico Nacional	27
	Apéndice C. Programa desarrollado para la etapa 2a de la metodología propuesta de control de calidad de mediciones de nivel del mar de la red del Servicio Mareográfico Nacional	31
	Apéndice D. Gráficas con la tendencia lineal estimada para los 18 sitios analizados. Se muestran ordenados de forma descendente por el número de años completos	34
	Apéndice E. Gráficas con la tendencia lineal preliminar estimada para estaciones que tienen datos actuales.	39

1. Introducción

Los océanos cubren el 71% de la superficie terrestre y contienen aproximadamente el 97% del agua del planeta. Entre sus funciones dentro del Sistema Climático se encuentra la absorción y la redistribución del dióxido de carbono. Además, albergan y dan sostenimiento a diversos ecosistemas. Entre los servicios que brindan a los seres humanos se encuentra el suministro de alimentos y de agua, diversos beneficios para la salud y el bienestar, valores culturales, turísticos, comerciales y de transporte. Particularmente en México, los océanos están ligados con actividades petroleras, turísticas, mineras, agrícolas, pesqueras, portuarias y de comercio marítimo.

Las comunidades que se encuentren conviviendo en los entornos costeros están expuestas a los cambios en los océanos como el incremento del nivel medio del mar. Estos cambios en el nivel del mar implican grandes retos no solo a las comunidades, sino también a la infraestructura y a los ecosistemas costeros; debido a que consecuencias como las inundaciones, la erosión y la entrada de agua salada a sistemas de agua dulce, incrementan y perturban las condiciones naturales y el desarrollo normal y cotidiano.

El incremento del nivel medio del mar está relacionado con dos factores: 1) con el incremento del volumen de agua debido a la expansión térmica de los océanos a medida que se calientan y 2) con el incremento de la masa de agua en el océano debido al derretimiento de masas de hielo terrestres tales como los glaciares de las montañas y las capas de hielo de la Antártida y Groenlandia. De acuerdo con el Informe Especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático llamado “El océano y la criosfera en un clima cambiante” [1], el nivel medio del mar a una escala mundial está aumentando en todas las regiones oceánicas (Fig. 1) y continuará aumentando a un ritmo cada vez mayor (Fig. 2).

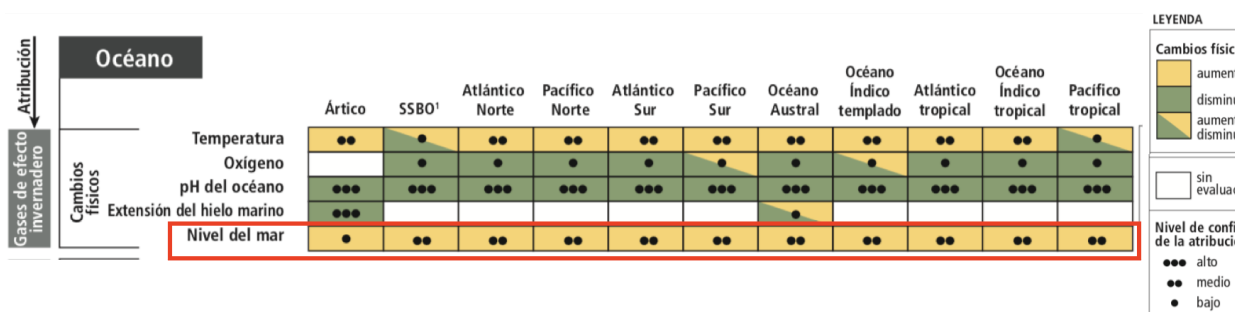


Figura 1. Impactos regionales observados que se derivan de cambios en los océanos y la criosfera. El rectángulo rojo resalta que en las diferentes regiones oceánicas el aumento del nivel medio del mar se reporta de bajo a medio. Imagen tomada y modificada de [1].

Por un lado se sabe que, a escala mundial, desde 1970 la causa dominante del aumento del nivel medio del mar es el forzamiento antropogénico y que para el periodo de 1902 a 2015 el aumento total del nivel medio del mar es de 16 cm (rango probable de 12 a 21 cm). Además se conoce que, la tasa de aumento para el período de 2006 a 2015 es de 3.6 mm/año^{-1} (rango muy probable de 3.1 a 4.1 mm/año^{-1}) y la suma de las contribuciones de los mantos de hielo y los glaciares son la fuente principal del aumento del nivel del mar (1.8 mm/año^{-1} con rango muy probable de 1.7 a 1.9 mm/año^{-1}).

Por otro lado se conoce que, el nivel medio del mar continuará aumentando a un ritmo cada vez mayor (Fig. 2) y que las proyecciones presentan diferencias regionales con respecto al nivel medio del mar a escala mundial. Es por esto que para determinar los impactos y las proyecciones del nivel medio del mar en cada región es preciso considerar los procesos naturales y antropogénicos locales, como son la subsidencia local causada por procesos relacionados con la tectónica de placas o las actividades humanas relacionadas con la compactación por la extracción local de agua subterránea, sólo por mencionar algunos.

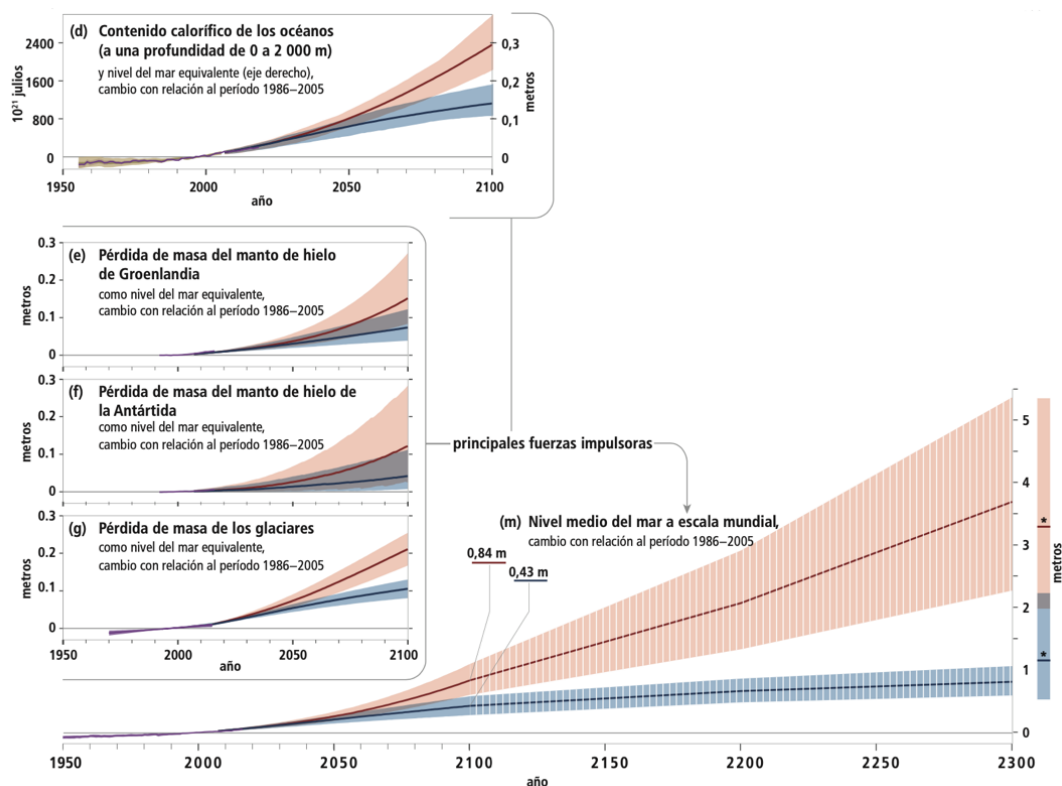


Figura 2. Cambios pasados y futuros en los océanos y la criosfera. Cambios históricos observados (línea morada), modelados en los océanos y la criosfera desde 1950. Cambios futuros proyectados en escenarios de bajas emisiones RPC2.6 (línea azul) y altas emisiones RPC 8.5 (línea roja) de gases de efecto invernadero. Tomada de [1].

1.1. México y sus costas

México se encuentra entre el Océano Pacífico, el Golfo de México y el Mar Caribe. De las 32 entidades federativas 17 tienen apertura al mar representando el 56% del territorio nacional (Fig 3). De estas 17 entidades, 11 interactúan directamente con el Océano Pacífico y 6 con el Golfo de México y el Mar Caribe.

La longitud de costa de México, sin considerar el territorio insular, es de 1,122 km, teniendo acceso 7,828 km al Océano Pacífico y Golfo de California y 3,294 km al Golfo de México y el Mar Caribe. México cuenta con 263 municipios costeros de los cuales 150 se encuentran frente al mar y 113 tienen influencia directa costera. De acuerdo con la Encuesta Intercensal de 2015 realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el 15.8% de la población de México se encuentra viviendo en estos municipios costeros, lo cual equivale a poco más de 19 millones de personas que pueden ser afectadas por los cambios en el nivel del mar.

De acuerdo con el índice de marginación 2020 publicado por el Consejo Nacional de Población (CONAPO), frente a la costa de México se encuentran 9 entidades con un grado de marginación de alto a muy alto, 1 con un grado de marginación medio y 7 con un grado de marginación bajo a muy bajo (Fig. 3).

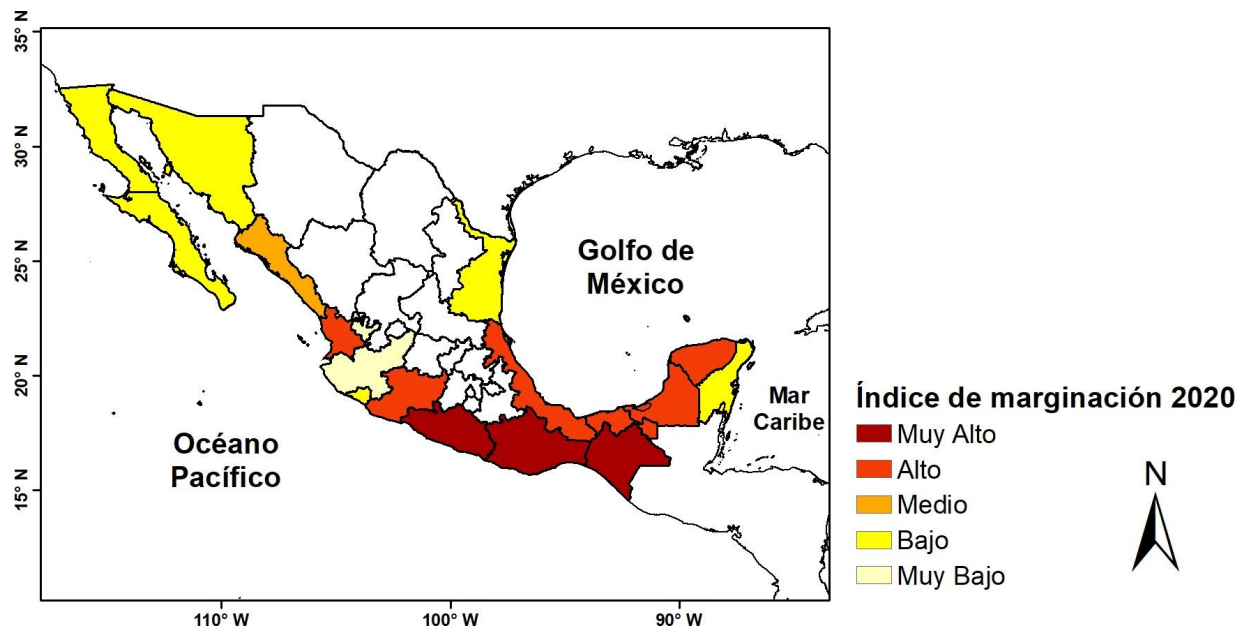


Figura 3. En color se representan las 17 entidades federativas costeras. El color representa el Índice de marginación 2020 de acuerdo a la CONAPO.

2. Objetivos

Considerando lo anterior los objetivos planteados en este proyecto son los siguientes.

2.1. General

Actualizar el estudio de las tendencias del nivel del mar en las costas de México publicado por Zavala et al. en 2010 haciendo uso de los datos del Servicio Mareográfico Nacional (SMN) y de las técnicas de control de calidad recomendadas en 2020 por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental.

2.2. Específicos

Para alcanzar dicho objetivo se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. Revisar y discutir la bibliografía de manuales oficiales, artículos de investigación e información de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental 2020 para determinar los diversos métodos de control de calidad empleados en las mediciones del nivel del mar.
2. Diseñar e implementar una metodología de control de calidad para la información del nivel del mar del SMN a partir de los métodos discutidos y seleccionados en el punto 1.
3. Revisar las mediciones del nivel del mar del SMN, históricas (1950-2000) y actuales (2001-2020), haciendo uso de la metodología de control de calidad propuesta en 2.
4. Actualizar el estudio de las tendencias del nivel del mar en las costas de México a partir de los resultados obtenidos en el punto 3.
5. Generar una base de datos con la información del nivel del mar para que sea incluida en el Portal de Datos para la Investigación en Cambio Climático del PINCC.

3. Red de monitoreo del Servicio Mareográfico Nacional

El monitoreo del nivel del mar en las costas de México fue iniciado por el Servicio Geodésico Interamericano (IGS) y el Departamento de Fotogrametría de la Secretaría de la Defensa Nacional. Las observaciones iniciales se realizaron en Tampico en el año de 1942, y continuaron en Coatzacoalcos y Progreso en 1946, Acapulco en 1949, Guaymas, La Paz y Ensenada en 1950, y finalizaron en Veracruz, Salina Cruz y Mazatlán en 1952.

A partir de 1952 el Instituto de Geofísica (IGEOF) de la UNAM se hizo cargo de la red de monitoreo y el procesamiento de la información generada, dando origen a lo que hoy se conoce como el Servicio Mareográfico Nacional. Durante esa época se estableció un convenio entre el

IGS, la Secretaría de Marina y el IGEOF para continuar la operación e instalación de las estaciones, así como con la adquisición y el procesamiento de los datos. En la actualidad, el SMN cuenta con una red de 28 estaciones de monitoreo del nivel del mar, de las cuales 12 se encuentran ubicadas en la costa del Pacífico, y 16 en la costa del Golfo de México y el Mar Caribe (Fig. 4). Cabe mencionar que para el análisis de este proyecto solo se consideraron las 18 estaciones analizadas en el artículo publicado por Zavala et al. en 2010 (ver Fig. 8) .

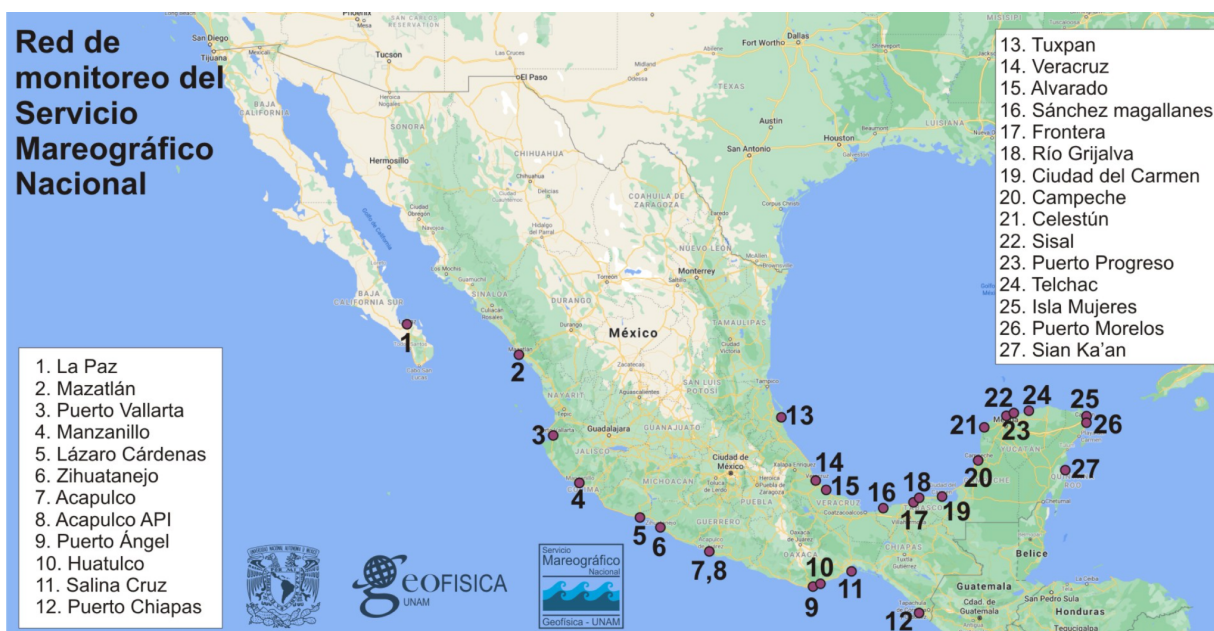


Figura 4. Ubicación de las 28 estaciones que forman la red de monitoreo del Servicio Mareográfico Nacional. Para mayor información revisar www.mareografico.unam.mx

Finalmente, es muy importante mencionar que, los datos generados por la red mareográfica del SMN, en algunos puntos de monitoreo, representan unas de las series ambientales más largas y completas que existen en México. Además de que, toda la información generada ha sido fundamental para la operación portuaria, la navegación, la corrección de cartas náuticas y la delimitación de la zona federal marítimo-terrestre. Asimismo, ha sido parte fundamental para el desarrollo del conocimiento de la dinámica del Pacífico tropical nororiental y del Golfo de California. Y sin ser menos importante, su contribución para el registro de las variaciones del nivel del mar producidas por tsunamis, marea de tormenta, corrientes costeras, así como movimientos de la corteza terrestre producidos por sismos o movimientos telúricos lentos, y fenómenos oceanográficos de gran escala como El Niño.

4. Metodología

A partir de una revisión bibliográfica sobre los diversos métodos de control de calidad que se aplican a las mediciones del nivel del mar [3-15], se definieron los métodos que se utilizaron para obtener una base de datos del nivel del mar robusta. Considerando estos métodos, se diseñó y se implementó una metodología de control de calidad en tres etapas (Fig. 5). Cabe mencionar que en el artículo de Zavala et al. (2010) no se menciona algún control de calidad hecho a las series de datos de nivel del mar.

1. Verificación inicial (L0): Durante esta etapa se realizan distintas revisiones tanto automatizadas como manuales para que los archivos de datos queden listos para el proceso de control de calidad.
2. Control de calidad automatizado (nombrado L1 en la literatura): En esta etapa se aplican métodos de control de calidad automáticos los cuales se definen como:
 - a. Métodos de control de calidad que no requieren de la información del pronóstico de marea astronómica.
 - b. Métodos de control de calidad que sí requieren de la información del pronóstico de marea astronómica.
3. Control de calidad manual (nombrado L2 en la literatura): En esta última etapa se revisan manualmente los datos para detectar y si es posible corregir errores que no pudieron ser solucionados durante la etapa 2.

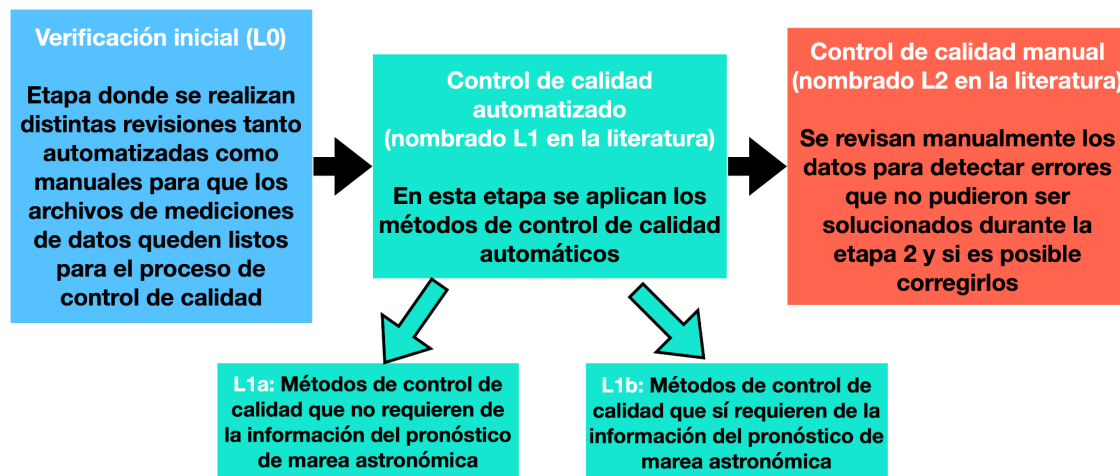


Figura 5. Metodología de control de calidad para las mediciones del nivel del mar diseñada e implementada en este proyecto.

La metodología de control de calidad propuesta se aplicó a los datos históricos del nivel del mar, los cuales abarcan del periodo de 1950 al 2000, mientras que para la información actual, que

abarca el periodo del 2001 al 2020, sólo se empleó la etapa 2 y 3. Esto debido a que, al estar la información almacenada dentro de una Base de Datos estructurada SQL (*Structured Query Language*) no fue necesario realizar las comprobaciones previas.

Para el periodo histórico se revisó la consistencia de 513 archivos con mediciones del nivel del mar lo cual consistió en lo siguiente:

- En la etapa 1 de verificación (L0), se revisaron los archivos históricos, uno por año de información para las 18 estaciones mareográficas (513 archivos) analizadas en [2]. Dichos archivos se encuentran en formato TOGA (*Tropical Ocean and Global Atmosphere*) [15], el cual es el formato de datos estandarizado para las mediciones del nivel del mar. Durante esta etapa las revisiones automáticas y manuales verificaron y solucionaron errores tales como datos de nivel del mar extra (días o hasta meses repetidos), problemas de encabezados incompletos, faltantes o erróneos, archivos falsos de mediciones, así como la identificación de picos y comportamientos anómalos en las gráficas mensuales generadas automáticamente de las mediciones horarias (Fig. 6). El total de gráficas revisadas visualmente fueron 6156, y a partir de ellas se generó un reporte por estación que contiene las observaciones de las revisiones. Un ejemplo de dicho reporte puede ser consultado en el Apéndice A para la estación Puerto Progreso. En el Apéndice B se presentan todos los programas desarrollados en Python para llevar a cabo el análisis automático y la generación de gráficos para esta etapa. Posteriormente, estos problemas identificados en el reporte son solucionados en la etapa L1. El detalle del resultado de este procedimiento se puede ver en la Fig. 7.

Cabe mencionar que las verificaciones relacionadas con encabezados, datos extra y archivos falsos también involucraron hacer una revisión del historial de la estación en cuestión, así como tomar en consideración el conocimiento de los analistas del SMN que participan en el proyecto.

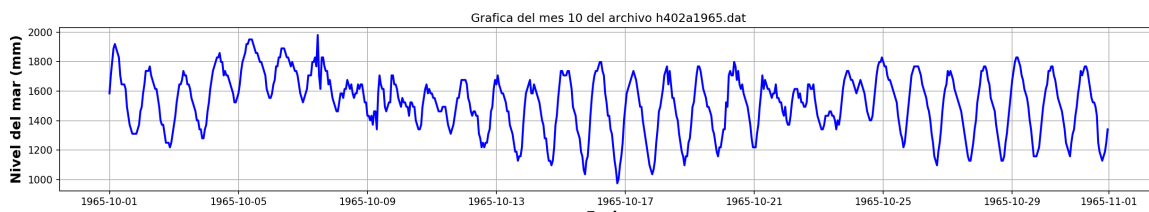


Figura 6. Ejemplo de gráfica mensual generada para octubre de 1965 para Puerto Progreso donde se identificaron picos en los días 6 y 10. El reporte generado para todos los años con medición para la estación puede consultarse en el Apéndice A.

- En la etapa 2 (L1) nombrada control de calidad automatizado, se programaron en Python los métodos de control de calidad de la etapa 2a (métodos de control de calidad que no requieren de la información del pronóstico de marea astronómica) los cuales se listan a continuación:
 - Revisión de número de datos correcto
 - Detección de caracteres inválidos
 - Revisión de sintaxis
 - Revisión de incremento cronológico del tiempo
 - Etiquetado de valores fuera de rango
 - Detección de picos mediante el método spline-fit
 - Prueba de estabilidad o de línea recta

En el Apéndice C se puede consultar el programa desarrollado para esta etapa.

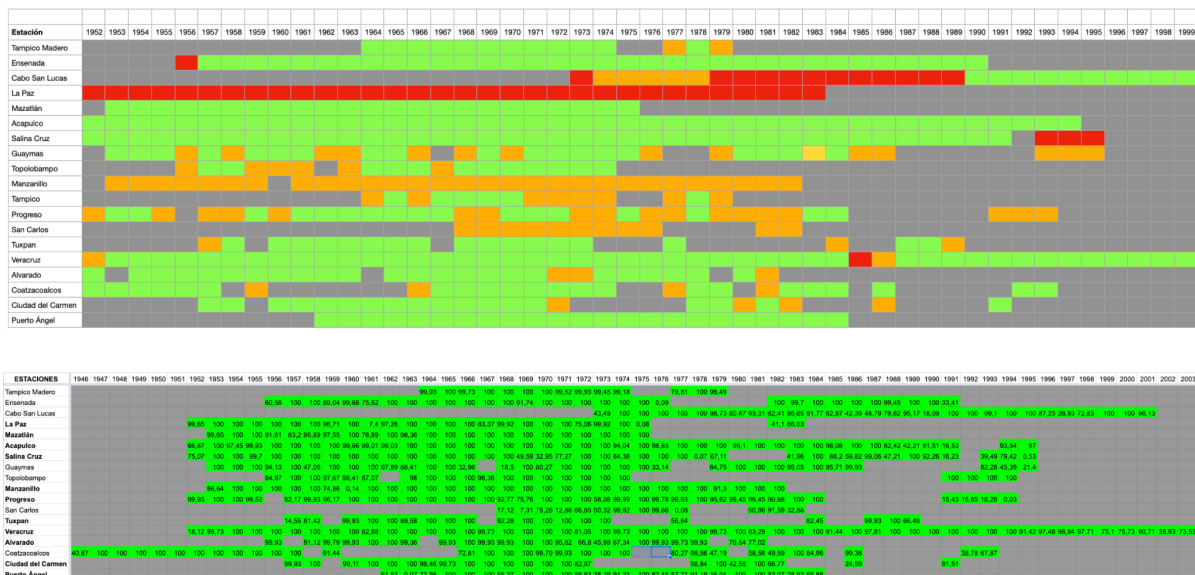


Figura 7. En la parte superior se listan los datos históricos utilizados para este estudio. Los cuadros en color verde no requirieron de preprocesamiento para el control de calidad L1, los cuadros en color naranja requirieron de un procesamiento intermedio, y los cuadros en color rojo de un alto procesamiento. En la parte inferior se puede ver que todos los archivos fueron corregidos y preparados para el control de calidad L1.

- Por otro lado, para la etapa 2b (métodos de control de calidad que sí requieren de la información del pronóstico de marea astronómica) se definieron los siguientes métodos¹:
 - Detección de picos (spline fit) aplicado al residual

¹ Métodos pendientes de programar.

- Análisis armónico
- Finalmente, la etapa de control de calidad manual (I2) es más “artesanal”, y depende directamente de la experiencia del revisor en la búsqueda de errores. En esta etapa participa personal altamente especializado del SMN para realizar las revisiones.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de la información para cada una de las 18 estaciones mareográficas analizadas. También se presenta el período en la que se tienen mediciones, el porcentaje promedio anual de medición calculado y el número de años con información promedio anual al 80% o al 100%. Se puede observar que la mayoría de las estaciones cuenta con mediciones anuales entre un rango que va desde el 81.2% al 98.4%. Sólo dos estaciones se encuentran por debajo de este rango, Puerto Ángel con promedio anual de medición del 73.7% y San Carlos con el 57.3%. En la Tabla 1 también se marcan en negritas las estaciones que cuentan con información actualizada que abarca el periodo de 2001 al 2020.

Tabla 1. Mediciones históricas de 1950 al 2000. Resumen con la información del periodo y porcentajes de medición para cada estación analizada. En negritas se marcan las estaciones que cuentan con información actualizada a 2020.

Sitio	Periodo histórico	Años con medición	% anual promedio de mediciones	Años con mediciones anuales		
				=100%	>= 80%	<= 50%
Cd. Madero, Tamps.	1964-1979	14	98.3	6	13	0
Ensenada, B.C.	1956-1991	31	91.9	22	27	2
Cabo San Lucas, B.C.S.	1973-2001	29	82.7	11	20	5
La Paz, B.C.S.	1952-1983	26	87.2	15	21	3
Mazatlán, Sin.	1953-1975	23	97.6	16	22	0
Acapulco, Gro.	1952-1995	42	94.5	26	39	2
Salina Cruz, Oax.	1952-1995	40	81.2	22	27	8
Guaymas, Son.	1953-1995	34	85.2	19	27	6
Topolobampo, Sin.	1956-1994	22	98.4	16	22	0
Manzanillo, Col.	1953-1982	30	94.4	26	27	1
Progreso, Yuc.	1952-1994	36	87.5	17	30	4
San Carlos, B.C.S.	1968-1983	13	57.3	1	5	5
Tuxpan, Ver.	1957-1989	20	89.2	11	17	1
Veracruz, Ver.	1952-2006	53	93.8	33	47	2
Alvarado, Ver.	1956-1981	23	92.1	6	18	1
Coatzacoalcos, Ver.	1946-1993	32	88.4	18	25	4
Cd. del Carmen, Camp.	1957-1991	22	91.1	12	19	2
Puerto Ángel, Oax.	1962-1984	23	73.7	9	13	4
Total de archivos procesados manual y automáticamente		513				

5. Resultados

Una vez aplicada la metodología propuesta de control de calidad a las 18 estaciones de monitoreo, se realiza la estimación de las tendencias a largo plazo en el nivel del mar [2] para 11 estaciones frente a la costa del Pacífico y para 7 frente a la costa del Golfo de México (Fig. 8).

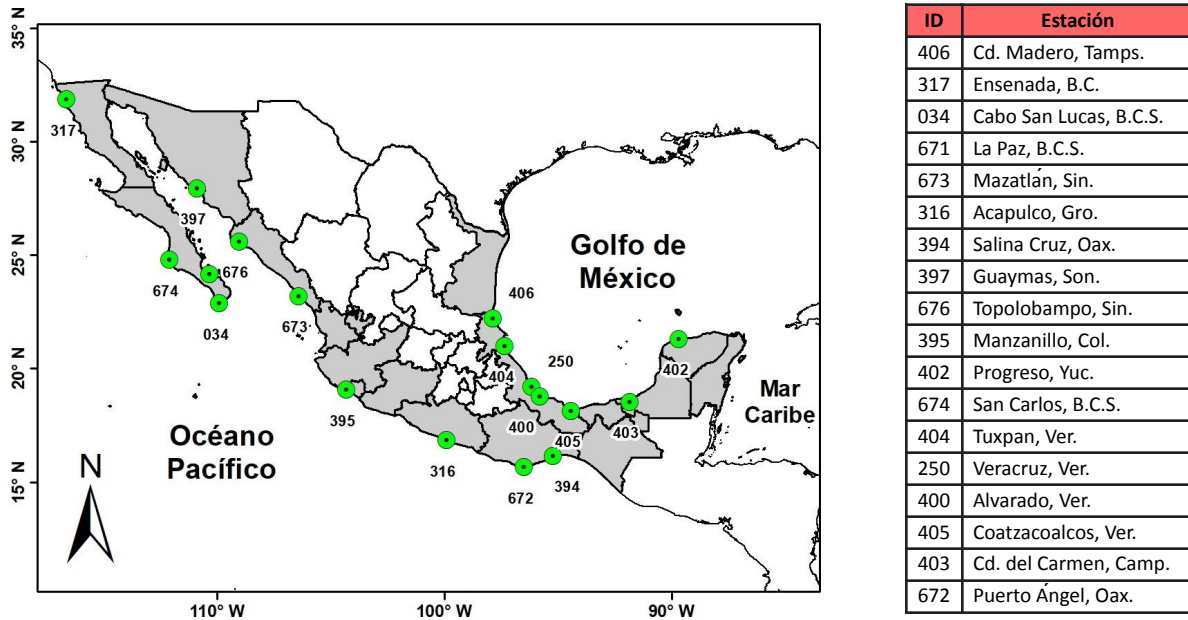


Figura 8. Estaciones mareográficas empleadas en el análisis de las tendencias del nivel del mar. La tabla de la derecha muestra el ID de la estación y el nombre de cada una.

Para calcular las tendencias se siguió lo publicado en [2] donde hacen uso de un ajuste lineal por medio del método de mínimos cuadrados, y para el cálculo de la incertidumbre de la pendiente emplean el error estándar y el valor crítico; siendo este último obtenido de la distribución *t-Student* con $n-2$ grados de libertad. Además, considerando lo expuesto en [2] referente a que “para estimar los cambios de largo plazo en el nivel del mar se requieren series de tiempo largas pues, el nivel del mar se modifica por diversos fenómenos que ocurren en distintas escalas de tiempo”, y sabiendo que, diferentes procesos locales tanto naturales y antropogénicos modifican el nivel del mar como la extracción local de agua subterránea o los movimientos locales de tierra vertical relacionados con la tectónica de placas, es que para el cálculo de las tendencias se consideraron únicamente años completos a fin de evitar sesgos.

En las Fig. 9 y 10 se presentan las tendencias estimadas para 4 sitios que se encuentran en el Golfo de México y para 2 sitios en el Pacífico, respectivamente. En cada gráfica de tendencia se puede observar lo siguiente: en líneas azules los promedios mensuales, en línea roja el

promedio móvil para 12 meses y en puntos negros los promedios anuales estimados únicamente para años completos. Estos años son los que se emplean para el cálculo de la tendencia lineal que se muestra en las gráficas como la recta en color negro. El número de años involucrados en el cálculo de la tendencia lineal para el caso de Veracruz fue de 44, para Alvarado de 19, para Coatzacoalcos de 23 y para Progreso de 30 años. Particularmente, podemos observar en estos sitios que, además de tener un índice de marginación alto el cual es un indicador de la intensidad de las privaciones padecidas por la población en términos de la educación, vivienda, distribución de la población e ingresos monetarios, se le suman las consecuencias debido al aumento del nivel medio del mar, siendo para Alvarado de $1.0 \pm 2.6 \text{ mm año}^{-1}$, para Veracruz de $1.8 \pm 0.6 \text{ mm año}^{-1}$, para Coatzacoalcos de $2.8 \pm 1.1 \text{ mm año}^{-1}$ y para Progreso de $3.7 \pm 1.3 \text{ mm año}^{-1}$. Para el caso de las tendencias mostradas en la Fig. 10 para 2 sitios en el Pacífico, el número de años considerados en el cálculo fue de 38 para Acapulco y de 26 para Salina Cruz; ambos sitios sobre ciudades con un índice de marginación muy alto. La tendencia del nivel del mar estimada para Acapulco fue de $3.4 \pm 1.6 \text{ mm año}^{-1}$ sin considerar los eventos tectónicos, mientras que para Salina Cruz fue de $-0.1 \pm 1.7 \text{ mm año}^{-1}$. Las gráficas de todos los sitios analizados pueden ser consultadas en el Apéndice D.

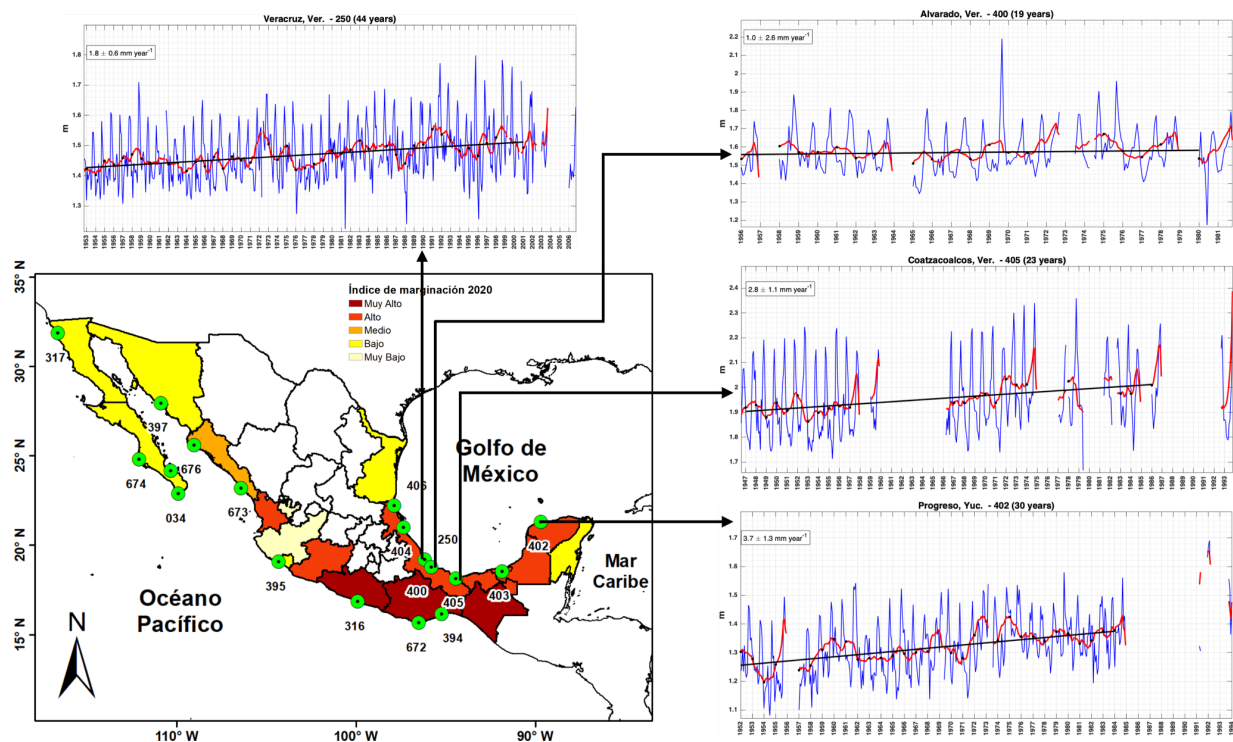


Figura 9. Tendencia estimada del nivel del mar para cuatro lugares en la costa del Golfo de México. En cada gráfica de tendencia se puede observar en líneas azules los promedios mensuales, en línea roja el promedio móvil para 12 meses, en puntos negros los promedios anuales calculados para años completos y la tendencia lineal como la recta en color negro.

En la Tabla 2 se muestra el resumen de las tendencias estimadas del nivel del mar y su correspondiente incertidumbre al 95% de confianza. Además, se puede observar para los 18 sitios su periodo de análisis y el número de años completos considerados en la estimación de la tendencia.

En la Fig. 11 se presenta un mapa con las tendencias calculadas. En colores rojos se muestran las tendencias positivas y en colores azules las tendencias negativas. De los 18 sitios analizados dos presentan tendencias negativas: Salina Cruz y Puerto Ángel en Oaxaca, sin embargo hay que considerar que para Puerto Ángel sólo se tomaron en cuenta 12 años para la estimación de la tendencia del nivel del mar.

ID	Estación	Periodo de análisis	Años completos	Tendencia [mm year ⁻¹]
406	Cd. Madero, Tamps.	1964-1979	13	8.3 ± 5.9
317	Ensenada, B.C.	1956-1991	27	1.9 ± 1.5
034	Cabo San Lucas, B.C.S.	1973-2001	20	0.2 ± 3.5
671	La Paz, B.C.S.	1952-1983	20	1.4 ± 2.1
673	Mazatlán, Sin.	1953-1975	20	1.4 ± 3.3
316	Acapulco, Gro.	1952-1995	38	3.4 ± 1.6
394	Salina Cruz, Oax.	1952-1995	26	-0.1 ± 1.7
397	Guaymas, Son.	1953-1995	26	3.7 ± 1.9
676	Topolobampo, Sin.	1956-1994	18	1.5 ± 2.8
395	Manzanillo, Col.	1953-1982	27	2.8 ± 2.2
402	Progreso, Yuc.	1952-1994	30	3.7 ± 1.3
674	San Carlos, B.C.S.	1968-1983	4	9.1 ± 28.2
404	Tuxpan, Ver.	1957-1989	16	2.0 ± 2.6
250	Veracruz, Ver.	1952-2006	44	1.8 ± 0.6
400	Alvarado, Ver.	1956-1981	19	1.0 ± 2.6
405	Coatzacoalcos, Ver.	1946-1993	23	2.8 ± 1.1
403	Cd. del Carmen, Camp.	1957-1991	18	3.0 ± 1.4
672	Puerto Ángel, Oax.	1962-1984	12	-2.9 ± 9.4

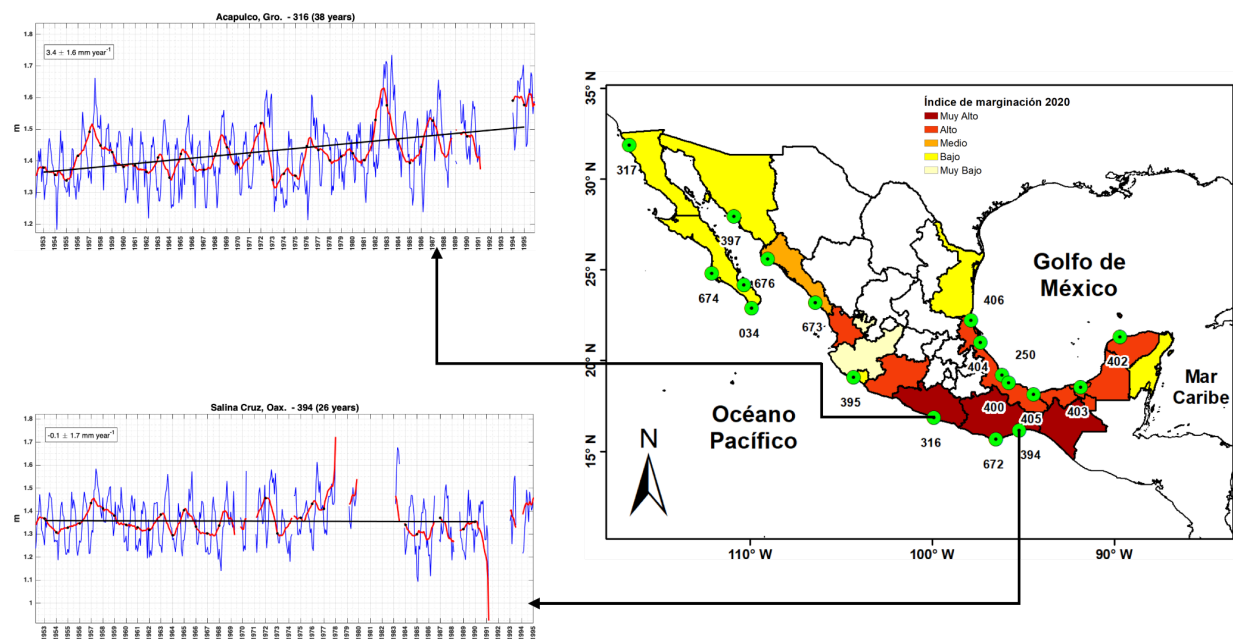


Figura 10. Tendencia estimada del nivel del mar para dos lugares en la costa del Pacífico. En cada gráfica de tendencia se puede observar en líneas azules los promedios mensuales, en línea roja el promedio móvil para 12 meses, en puntos negros los promedios anuales calculados para años completos y la tendencia lineal como la recta en color negro.

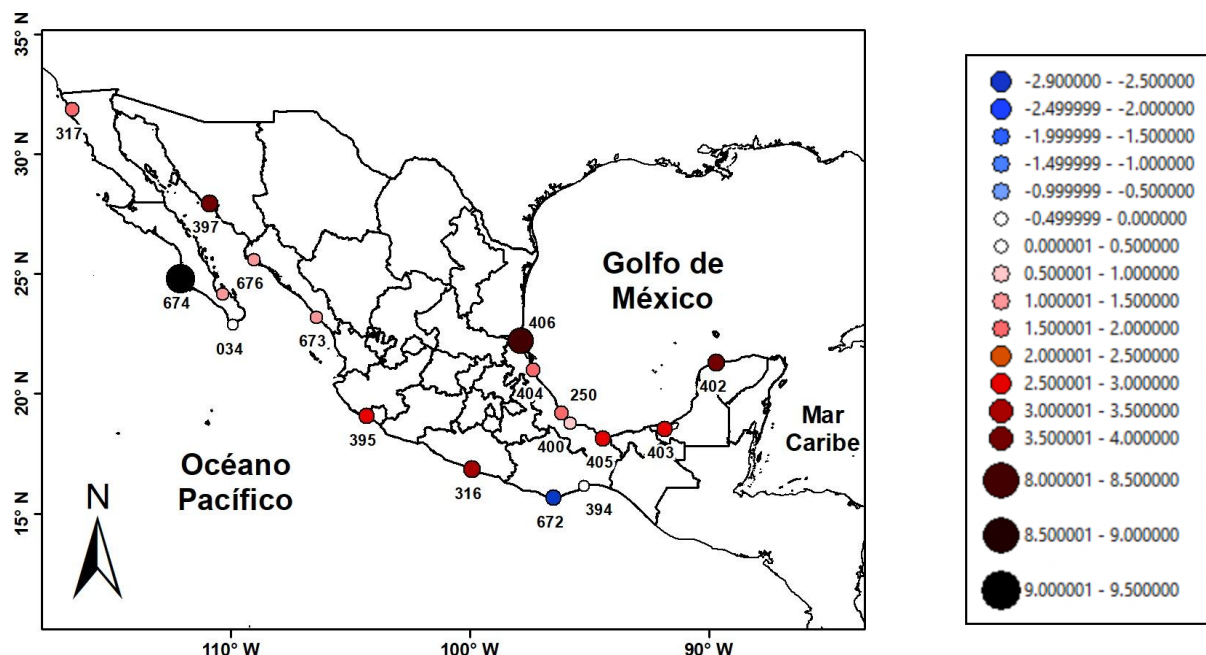


Figura 11. Mapa con las tendencias del nivel del mar para los 18 sitios analizados. En colores rojos se muestran las tendencias positivas y en colores azules las tendencias negativas.

Con respecto a las series de datos actuales, ya se realizó el control de calidad automatizado de las estaciones que actualmente siguen en operación en el Servicio Mareográfico Nacional (9 de las 18 históricas analizadas). Se realizó un cálculo preliminar de la tendencia sobre estos datos, el cual se puede observar en el Apéndice E. Cabe mencionar que en este proceso todavía hay mucho que realizar para empatar las series actuales con las históricas haciendo uso de la información de nivelación de cada estación. Un ejemplo de este proceso se puede ver en la Figura 12.

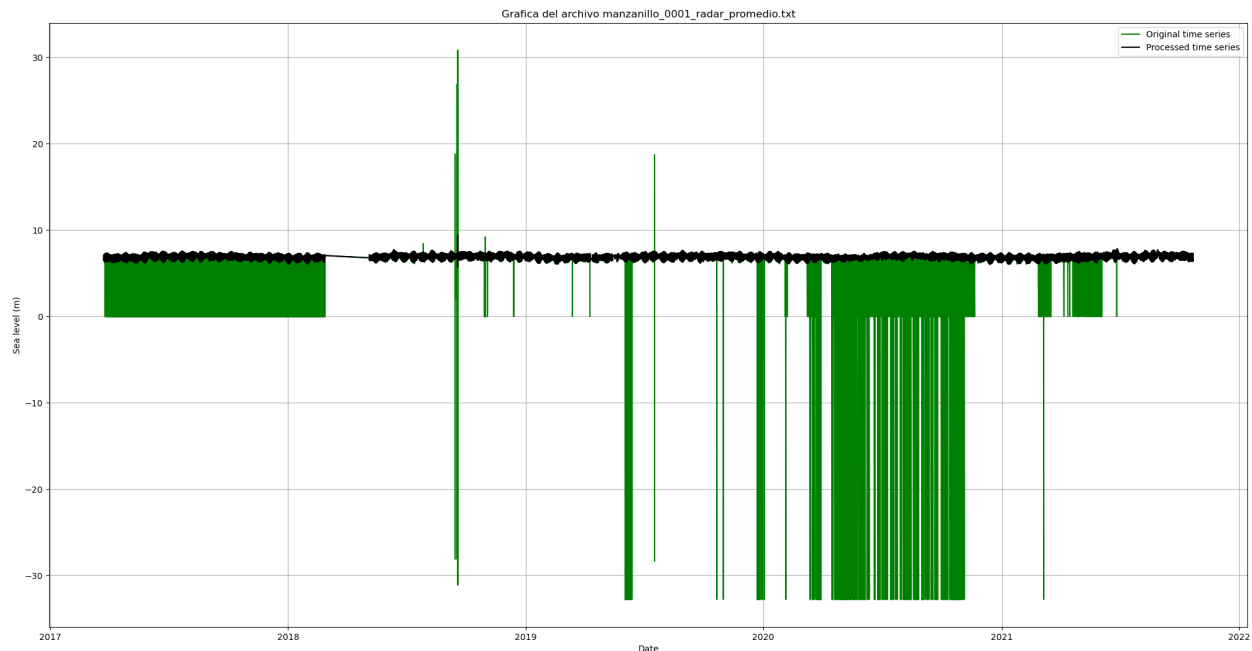


Figura 12. Ejemplo de una serie de tiempo de datos actuales corregida. En color verde se muestran los datos originales, y en color negro los datos corregidos.

6. Conclusiones

Durante este proyecto se diseñó e implementó una metodología de control de calidad que considera procesos automáticos y manuales, la cual permite generar información robusta del nivel del mar a partir de la red de monitoreo del SMN. Contar con series de datos de nivel del mar con un alto control de calidad permite asegurar la robustez de los resultados de estudios basados en dichos datos [7].

La metodología de control de calidad propuesta permite ser aplicada a las nuevas mediciones obtenidas por la red del SMN, a fin de mantener series de datos largas con un alto control de calidad. Asimismo, esta metodología, tanto su planteamiento como su implementación, puede ser compartida con otras redes de monitoreo del nivel del mar como por ejemplo la Secretaría de Marina, el Instituto Mexicano del Transporte y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, para contribuir en el desarrollo de información con un alto control de calidad.

Por otro lado, en este proyecto también se realizó un estudio de la tendencia lineal del nivel del mar en 18 sitios distribuidos tanto en el Pacífico mexicano como en el Golfo de México. El

análisis realizado en este proyecto involucró, dentro de las 18 estaciones analizadas, todas las estaciones reportadas en el artículo publicado por Zavala et al. (2010). Como trabajo a futuro se pretende incorporar al estudio el resto de las estaciones que no fueron consideradas en este primer análisis.

Con lo anterior buscamos fortalecer los estudios regionales en los diferentes sitios de monitoreo a nivel nacional para generar investigación donde todavía no existe o no está actualizada.

Finalmente, no está por demás mencionar que es necesario continuar apoyando el monitoreo del nivel del mar bajo esquemas de control de calidad más robustos para generar datos confiables con estándares de calidad internacional.

7. Resultados y productos derivados

Conferencias y pláticas de divulgación

- E. D. López-Espinoza, O. Gómez-Ramos, M. A. Zarza-Alvarado, F. Hernández-Maguey, K. Hernández-Sotelo, K. Renó-Domingos, A. J. Rocha-Bermúdez, J. Zavala-Hidalgo. Tendencias del nivel del mar en algunas zonas costeras de México. Conferencia en la Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, A.C. 2021, Guadalajara, Jal. Noviembre de 2021.
- O. Gómez-Ramos. El Servicio Mareográfico Nacional, vigía del mar en costas mexicanas. Plática de divulgación, Noche de Museos, Museo de Geofísica. Noviembre de 2021.
- O. Gómez-Ramos. El nivel del mar va en aumento ¿Debemos preocuparnos?. Entrevista, portal web de Ciencia UNAM. Noviembre de 2021.
- O. Gómez-Ramos. Servicios Geofísicos: El Servicio Mareográfico Nacional. Plática de divulgación, en el contexto de los festejos por el 50 aniversario de Educación Continua UNAM.
- O. Gómez-Ramos. Estudios de tendencias del nivel del mar en México: ¿qué hay y qué se está haciendo?. Ciclo de seminarios ¿Qué sabemos sobre el cambio climático en México? Módulo 2: El cambio climático en México. CdMx. Junio de 2021.
- E. D. López-Espinoza y O. Gómez-Ramos. Actualización de las tendencias del nivel del mar en las costas de México. Taller de inicio de proyectos PINCC de la convocatoria 2020. Febrero de 2021.

Recursos humanos

Alumnos becados bajo el proyecto

Los siguientes alumnos estuvieron becados en el proyecto y su trabajo involucró realizar el control de calidad de los datos históricos:

- Katia Hernández Sotelo. Licenciatura en Ciencias de la Tierra, UNAM-(7 meses)
- Karina Renó Domingos. Ingeniería Geomática, Universidad Federal Rural de Río de Janeiro-(1 mes)
- Alejandro José Rocha Bermúdez. Ingeniería Geomática, Universidad de Costa Rica-(3 meses)
- Ana Laura López de los Santos. Ingeniería Geomática en la Facultad de Ingeniería de la UNAM-(9 meses)
- Vivaldo Garcia Perales. Ingeniería Geomática en la Facultad de Ingeniería de la UNAM-(5 meses)
- Sandra de la Cruz Garduño. Ingeniería Geomática en la Facultad de Ingeniería de la UNAM-(9 meses)

Tesis

- Katia Hernández Sotelo. Variaciones del nivel del mar debidas a El Niño en las costas del Pacífico mexicano. Licenciatura en Ciencias de la Tierra. Asesor Dr. Jorge Zavala Hidalgo.
EN CORRECCIÓN DE LAS REVISIONES DEL JURADO.

Productos

- Software en Python de control de calidad para datos del nivel del mar del SMN.
- Generación de una base de datos para el Portal de Datos para la Investigación en Cambio Climático del PINCC la cual contiene los datos históricos y actuales.
- Artículo "Quality control of sea level data for the calculation of long-term trends in the Mexican coasts". Autores: E.D. López-Espinoza, O. Gómez-Ramos, E. Cabral-Cano, E.A. Fernández-Tórres, J. Zavala-Hidalgo, M.E. Osorio-Tai. En proceso.

8. Referencias

1. IPCC (2019). "Resumen para responsables de políticas", en: *Informe especial sobre los océanos y la criosfera en un clima cambiante del IPCC* [H. O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (eds.)]. En prensa.
2. Zavala-Hidalgo, J., de Buen Kalman, R., Romero-Centeno, R., & Maguey, F. H. (2010). Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas. Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático, 249-268.
3. Stella Pytharouli, Spyros Chaikalis, Stathis C. Stiros, Uncertainty and bias in electronic tide-gauge records: Evidence from collocated sensors, *Measurement*, Volume 125, 2018, Pages 496-508, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.05.012>.

4. T. Aarup, Guy Woppelmann, P.L. Woodworth, F. Hernandez, B. Vanhoorne, et al.. Comments on the article “Uncertainty and bias in electronic tide-gauge records: Evidence from collocated sensors” by Stella Pytharouli, Spyros Chaikalis, Stathis C. Stiros in *Measurement* (Volume 125, September 2018). *Measurement*, Elsevier, 2019, 135, pp.613-616. <10.1016/j.measurement.2018.12.007>. <hal-01956455>
5. Hein, H., Barjenbruch, U., Blasi, C., & Mai, S. (2012). Computer-aided quality assurance of high-resolution digitized historic tide-gauge records.
6. Bradshaw, E., Garcia, M., Perez-Gomez, B., Raicich, F., & Rickards, L. (2004). Standards for Sea Level Data Quality Control, European Sea-Level Service (ESEAS) Sea Level Workshop, St. Julians, Malta. 01 - 05 November 2004.
7. UNESCO/IOC (2020) Quality Control of in situ Sea Level Observations: A Review and Progress towards Automated Quality Control, Vol. 1. (eds. Pérez Gómez, B., et al). Paris, France, UNESCO, 70pp. (IOC Manuals and Guides No.83, Vol. 1). (IOC/2020/MG/83Vol.1). DOI: <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-854>
8. Hannah, J. (2011). The difficulties in using tide gauges to monitor long-term sea level change. *Survey Quarterly*, 300(65), 19.
9. Costanza, A., D'Anna, G., D'Alessandro, A., Vitale, G., Fertitta, G., & Cosenza, P. (2017, June). Mechanical aspects in a tide gauge station design. In *OCEANS 2017-Aberdeen* (pp. 1-10). IEEE.
10. Bushnell, M., & Worthington, H. (2016). Manual for real-time quality control of water level data: a guide to quality control and quality assurance for water level observations.
11. Wöppelmann, G., Marcos, M., Coulomb, A., Míguez, B. M., Bonnetain, P., Boucher, C., ... & Tiphaneau, P. (2014). Rescue of the historical sea level record of Marseille (France) from 1885 to 1988 and its extension back to 1849–1851. *Journal of Geodesy*, 88(9), 869-885.
12. Bradshaw, E., Rickards, L., & Aarup, T. (2015). Sea level data archaeology and the global sea level observing system (GLOSS). *GeoResJ*, 6, 9-16.
13. Data Quality Control, Pan-european Infrastructure for Ocean & Marine Data Management, Sitio web: <https://www.seadatanet.org/Standards/Data-Quality-Control>
14. Powell, V. A., McGlashan, D. J., & Duck, R. W. (2012). Use of local tidal records to identify relative sea level change: accuracy and error for decision makers. *Journal of Coastal Conservation*, 16(4), 597-607.
15. McPhaden, M.J., A.J. Busalacchi, and D.L.T. Anderson. 2010. A TOGA retrospective. *Oceanography* 23(3):86–103, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2010.26>.

Apéndice A. Ejemplo del reporte manual generado para cada estación con información histórica

Estación	Puerto Progreso			
Periodo	1952-1994			
Años faltantes	7			
Año	Faltantes	% Válidos	% No válidos (9999)	Observaciones de las gráficas
1952		99.93	0.07	Enero(Pico el 23) Febrero(Pico el 19) Abril a Julio-Septiembre-Octubre(Comportamiento extraño) Agosto(Pico en 04)
1953		100.00	0.00	Enero(Comportamiento extraño el 23) Julio(Comportamiento extraño) Agosto(Comportamiento extraño y varios picos)
1954		100.00	0.00	Enero(Pico en el 18) Febrero(Evento 23 al 25 y pico 28) Marzo(Varios picos?) Mayo-Septiembre(Comportamiento Extraño) Junio a Agosto(Varios picos y comportamiento extraño)
1955		99.52	0.48	Enero(Comportamiento extraño) Febrero(Pico el 11) Marzo(Pico 28) Julio(Varios picos y comportamiento extraño) Agosto(Varios Picos) Septiembre-Octubre(Comportamiento o extraño)
1956				
1957		92.17	7.83	Enero(Gráfica hasta el 17) Febrero a Mayo(Comportamiento Extraño) Julio-Septiembre(Comportamiento extraño)(Varios picos y comportamiento extraño)

1958		99.93	0.07	Enero(Varios Picos) Febrero-Marzo(Comportamiento Extraño) Julio-Septiembre(Comportamiento extraño) Octubre-Diciembre(Varios picos y comportamiento extraño)
1959		96.17	3.83	Enero(Picos el 06. el 16) Febrero(Comportamiento Extraño el 26) Marzo-Octubre(Comportamiento Extraño) Junio(Comportamiento extraño y pico el 14) Julio-Agosto((Varios picos y comportamiento extraño)
1960		100.00	0.00	Enero(Pico el 30) Febrero(Varios Picos) Abril(Pico el 28) Mayo(Pico el 03) Julio(Vacío de información del 15 al 30) Agosto (Varios picos y comportamiento extraño)
1961		100.00	0.00	Febrero(Varios Picos) Marzo-Mayo(Comportamiento Extraño) Abril(Picos el 13 y el 16) Junio(Pico el 13) Julio a Septiembre(Varios picos y comportamiento extraño)
1962		100.00	0.00	Marzo(Pico 24) Mayo(Comportamiento extraño) Junio(Pico el 10) Julio(Varios picos) Agosto(Evento extraño) Septiembre(Varios picos y comportamiento extraño)
1963		100.00	0.00	Enero(Pico el 26) Mayo-Junio-Agosto(Comportamiento extraño) Septiembre(Varios picos y comportamiento extraño)
1964		100.00	0.00	Enero(Varios Picos) Febrero(Pico el 08) Marzo(Evento extraño el 28) Junio(Picos el 11 y 14) Julio-Agosto(Varios picos y comportamiento extraño) Octubre(Comportamiento extraño) Diciembre(Picos 15 y el 29)

1965		100.00	0.00	Febrero(Pico el 25) Marzo(Pico el 20?) Mayo(Comportamiento extraño) Agosto(Varios picos) Octubre(Picos el 06 y el 10) Diciembre(Picos el 20)
1966		100.00	0.00	Enero(Pico el 30) Febrero(Comportamiento extraño el 18) Marzo-Mayo(Comportamiento Extraño) Abril-Septiembre(Picos y comportamiento extraño) Julio-Agosto(comportamiento extraño) Noviembre(Pico el 03)
1967		100.00	0.00	Enero(Pico el 04) Junio-Agosto(Comportamiento Extraño) Julio(Varios picos y comportamiento extraño) Septiembre-Diciembre(Comportamiento extraño)
1968		92.77	7.23	Abril(Vacío de 02 al 27) Mayo(Pico el 13) Julio-Agosto-Diciembre(Varios picos y comportamiento extraño) Septiembre(Pico el 09)
1969		75.76	24.24	Enero(Picos?) Marzo-Septiembre(Comportamiento Extraño) Abril(Grafica hasta el 01 a las 12) Mayo(Vacío) Junio(Comportamiento Extraño***) Julio-Agosto(Varios picos y comportamiento extraño) Octubre(Pico el 02)
1970		100.00	0.00	Junio(Pico el 27) Julio(Pico el 24 y comportamiento extraño) Septiembre(Comportamiento extraño)
1971		100.00	0.00	Abril (Pico el 26) Mayo(Varios Picos) Junio-Agosto-Septiembre(Comportamiento extraño y varios picos) Julio-Octubre(comportamiento extraño)

1972		100.00	0.00	Enero(Picos 15 y 16) Febrero(Comportamiento Extraño) Mayo(Varios Picos) Julio-Septiembre(Varios picos) Diciembre(Varios picos y comportamiento extraño)
1973		58.08	41.92	Enero(Picos 12) Marzo(Gráfica hasta el 05) Abril a Julio(Vacio) Agosto({comportamiento extraño y varios picos) Octubre(Comportamiento extraño)
1974		99.99	0.01	Enero(Picos 23) Marzo(Comportamiento Extraño y vacío de información del 12 al 13) Mayo(Comportamiento extraño y varios picos) Junio(Pico el 20) Julio-Agosto-Octubre(Varios picos y comportamiento extraño) Septiembre(comportamiento extraño) Diciembre(Pico el 12)
1975		100.00	0.00	Enero(Picos 13 y 14) Marzo-Junio(Comportamiento Extraño) Julio a Octubre(Varios picos y comportamiento extraño) Noviembre(Pico el 29)
1976		99.78	0.22	Enero a Marzo-Junio-Octubre(Comportamiento Extraño) Abril (Pico el 09) Julio a Septiembre(Varios picos y comportamiento extraño) Noviembre(Pico el 19)
1977		99.93	0.07	Enero-Marzo-Mayo-Octubre-Diciembre(Comportamiento Extraño) Abril(Picos el 17 y el 23) Julio a Septiembre(Varios picos y comportamiento extraño)
1978		100.00	0.00	Enero a Marzo-Octubre(Comportamiento Extraño) Mayo(Comportamiento extraño y picos de información) Junio(Comportamiento extraño y pico el 24) Julio-Septiembre(Varios picos y comportamiento extraño) Agosto(Pico el 11)

1979		95.62	4.38	Enero-Marzo-Septiembre(Comportamiento Extraño) Abril a Julio-Agosto(Picos, comportamiento extraño y vacíos de información) Octubre(Vacío de información del 23 al 24) Noviembre(Comportamiento extraño y picos el 09 y el 30) Diciembre(Vacíos de información del 04 al 06 y del 08 al 10)
1980		99.45	0.55	Marzo(Comportamiento Extraño y Pico el 06) Abril(Comportamiento extraño) Mayo(Pico el 27) Junio(Pico el 09) Julio-Septiembre(Varios picos y comportamiento extraño) Agosto(Varios picos, vacíos de información y comportamiento extraño) Diciembre(Vacío de información del 22 al 23)
1981		99.45	0.55	Febrero(Pico el 12) Marzo(Comportamiento Extraño y vacío de información 26 al 28) Junio-Julio(Comportamiento Extraño y vacío de información) Agosto-Septiembre(Varios picos y comportamiento extraño) Octubre(Pico el 19)
1982		90.68	9.32	Enero(Picos 15) Febrero(Pico el 02) Marzo(Gráfica hasta el 05) Junio(Vacío de información del 09 al 12 y del 20 al 22 y comportamiento extraño) Julio(Comportamiento extraño y vacío de información del 14 al 15) Agosto-Septiembre-Noviembre(Varios picos y comportamiento extraño)
1983		100.00	0.00	Febrero-Marzo(Comportamiento extraño) Mayo(Pico el 27) Julio(Comportamiento Extraño y varios picos) Septiembre(Pico el 04)
1984		100.00	0.00	Enero(Picos 22) Mayo-Diciembre(Comportamiento Extraño) Agosto-Octubre(Varios picos y comportamiento extraño)
1985				

1986				
1987				
1988				
1989				
1990				
1991		15.43	84.57	Enero a Marzo-Junio a Noviembre(Vacía) Abril(Vacío de información del 20 al 23) Mayo(Grafica hasta el 10 y vacío de información en el 08) Diciembre(Grafica del 06 hasta el 27)
1992		15.85	84.15	Enero(Comportamiento Extraño) Febrero(Vacío de información 02 al 04 y del 25 al 28) Marzo (Varios vacíos de información) Abril a Diciembre(Vacio)
1993		18.26	81.74	Enero a Septiembre(Vacía) Octubre(Comportamiento extraño) Noviembre(Grafica hasta el 24 y vacío de información del 03 al 06) Diciembre(Grafica del 02 hasta el 31)
1994		0.03	99.97	Enero(Gráfica hasta el 01 a las 2:00) Febrero a Diciembre(Vacio)
	Promedio	89.96	10.04	
Completos	34			
Incompletos	0			
Total	34			

Apéndice B. Programas desarrollados para la etapa 1 de la metodología propuesta de control de calidad de las mediciones de nivel del mar de la red del Servicio Mareográfico Nacional

Programa para comprobar el formato general de los datos TOGA (comprobar_datos_TOGA.py)

```
from datetime import timedelta
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import datetime
import sys
import os

# Funci'on que determina si un a'no es bisiesto o no
def es_bisiesto(a'no):
    resto = a'no % 4
    if resto == 0:
        resto = a'no % 100
        if resto == 0:
            resto = a'no % 400
            if resto == 0:
                return True
            else:
                return False
        else:
            return True
    else:
        return False

# Verificar que se haya pasado el n'umero correcto de par'ametros
if len(sys.argv) < 2:
    print("No se ha proporcionado el nombre del archivo a verificar")
    quit()

# Obtener el nombre del archivo de entrada a procesar de la lista de par'ametros
nombre_archivo = sys.argv[1]
print("Se va a cargar el archivo: "+nombre_archivo)

# Leer el archivo de datos y guardarlo en un dataframe de Pandas
matriz_toga = pd.read_table(nombre_archivo, delim_whitespace = True, names = ["StationID", "StationName", "Date", "D1", "D2", "D3", "D4", "D5", "D6", "D7", "D8", "D9", "D10", "D11", "D12"], engine = 'python', skiprows = 1, na_values = "9999")

# Obtener el a'no del archivo
fecha = str(matriz_toga["Date"][0])

# Crear la fecha de control
fecha_control=datetime.datetime(int(fecha[:4]),1,1)
hora_control=1
dias_faltantes=0
dias_existentes=0
a'no_final=int(fecha[:4])+1
ind = 0

# Calcular cu'antas lineas de datos se esperan
if es_bisiesto(int(fecha[:4])):
    dias_esperados=366*2
else:
    dias_esperados=365*2

print("Archivo "+nombre_archivo+" cargado, se han encontrado datos del a'no "+fecha_control.strftime("%Y"))
print("El archivo debe contener "+str(dias_esperados)+" l'ineas de datos y se han encontrado "+str(len(matriz_toga.index)))
if len(matriz_toga.index) > dias_esperados:
    print("El archivo contiene m'as lineas de las que deber'ia tener, debe ser procesado para poder ser analizado.")
    quit()

# Generar una a una las fechas y compararlas con el dataframe
while fecha_control.year < a'no_final:
    if ind < len(matriz_toga.index):
```



```

# Cargar la fecha del dataframe
fecha = str(matriz_toga["Date"][ind])
# Verificar si la fecha de control y la fecha del dataframe son iguales
if fecha == fecha_control.strftime("%Y%m%d")+str(hora_control):
    # Contar el día existente
    dias_existentes = dias_existentes+1
else:
    # Si la fecha de control y la fecha del dataframe no son iguales, avisar al usuario y contar la línea faltante
    print("No se encontr'o la fecha "+fecha_control.strftime("%Y%m%d")+str(hora_control))
    dias_faltantes=dias_faltantes+1
    # Avanzar con la fecha de control hasta que sea igual a la del dataframeo se acabe el año
    while fecha != fecha_control.strftime("%Y%m%d")+str(hora_control) and fecha_control.year < anio_final:
        # Avanzar la fecha de control
        if hora_control == 1:
            hora_control = 2
        else:
            hora_control = 1
        fecha_control=fecha_control+timedelta(days=1)
        if fecha == fecha_control.strftime("%Y%m%d")+str(hora_control):
            # Si la fecha de control y la fecha del dataframe son iguales, contarla
            dias_existentes=dias_existentes+1
        else:
            # Si la fecha de control y la fecha del dataframe no son iguales, avisar al usuario y contar la línea faltante
            print("No se encontr'o la fecha "+fecha_control.strftime("%Y%m%d")+str(hora_control))
            dias_faltantes=dias_faltantes+1
    # Incrementar el índice del dataframe
    ind = ind + 1
    # Avanzar la fecha de control
    if hora_control == 1:
        hora_control = 2
    else:
        hora_control = 1
        fecha_control=fecha_control+timedelta(days=1)
# Notificar al usuario si el archivo est'a completo o no
if dias_faltantes == 0:
    print("Fin del analisis, el archivo esta completo, se han encontrado las "+str(dias_existentes)+" líneas de datos esperadas.")
else:
    print("Fin del analisis, al archivo le hicieron falta "+str(dias_faltantes)+" filas de datos.")
datos_validos=(dias_faltantes+dias_existentes)*12-matriz_toga.isna().sum().sum()
print("Hay "+str(datos_validos)+" datos validos (" +str("{0:.2f}".format(datos_validos*100/((dias_faltantes+dias_existentes)*12)))+"%") y
"+str(matriz_toga.isna().sum().sum())+" datos nulos (" +str("{0:.2f}".format(matriz_toga.isna().sum().sum()*100/((dias_faltantes+dias_existentes)*12)))+"%")

```

Programa para agregar fechas faltantes

(agregar_fechass_faltantes.py)

```

from datetime import timedelta
import pandas as pd
import datetime
import sys
import os
# Verificar que se haya pasado el n'umero correcto de par'ametros
if len(sys.argv) < 2:
    print("No se ha proporcionado el nombre del archivo a acompletar")
    quit()

# Obtener el nombre del archivo de entrada a procesar de la lista de par'ametros
nombre_archivo = sys.argv[1]
print("Se va a trabajar con el archivo: "+nombre_archivo)
# Crear el archivo de salida corregido
archivo_salida = open("completed-"+nombre_archivo, 'w+')
# Leer el encabezado del archivo de entrada y escribirlo en el archivo de salida
archivo_entrada = open(nombre_archivo, "r")
if archivo_entrada.mode == 'r':
    archivo_salida.write(archivo_entrada.readline())

```

```

archivo_entrada.close()
# Leer el archivo de datos de entrada y guardarlo en un dataframe de Pandas
matriz_toga = pd.read_table(nombre_archivo, delim_whitespace = True, names = ["StationID", "StationName", "Date", "D1", "D2", "D3", "D4", "D5", "D6", "D7",
"D8", "D9", "D10", "D11", "D12"], engine = 'python', skiprows = 1)
ind = 0
# Obtener el anio del archivo, as'i como el ID de estaci'on y el nombre de la estaci'on
fecha = str(matriz_toga["Date"][0])
id_estacion = str(matriz_toga["StationID"][0])
nombre_estacion = str(matriz_toga["StationName"][0])
# Crear la fecha de control
fecha_control=datetime.datetime(int(fecha[:4]),1,1)
hora_control=1
anio_final=int(fecha[:4])+1
# Generar datos para cada fecha del anio
while fecha_control.year < anio_final:
    # Cargar la fecha del dataframe
    fecha = str(matriz_toga["Date"][ind])
    # Verificar si la fecha de control y la fecha del dataframe son iguales
    if fecha == fecha_control.strftime("%Y%m%d")+str(hora_control):
        # Si la fecha de control y la fecha del dataframe son iguales, escribir los datos
        archivo_salida.write(id_estacion+" "+nombre_estacion+" "+fecha_control.strftime("%Y%m%d")+str(hora_control)+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D1"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D2"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D3"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D4"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D5"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D6"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D7"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D8"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D9"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D10"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D11"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D12"][ind])+"\n")
    else:
        # Si la fecha de control y la fecha del dataframe no son iguales, escribir la linea de datos nulos
        archivo_salida.write(id_estacion+" "+nombre_estacion+" "+fecha_control.strftime("%Y%m%d")+str(hora_control)+" 9999 9999 9999 9999 9999 9999 9999
9999 9999 9999 9999 9999\n")
    # Avanzar con la fecha de control hasta que sea igual a la del dataframe se acabe el año
    while fecha != fecha_control.strftime("%Y%m%d")+str(hora_control) and fecha_control.year < anio_final:
        # Avanzar la fecha de control
        if hora_control == 1:
            hora_control = 2
        else:
            hora_control = 1
        fecha_control=fecha_control+timedelta(days=1)
        # Si la fecha de control y la fecha del dataframe son iguales, escribir los datos
        if fecha == fecha_control.strftime("%Y%m%d")+str(hora_control):
            # Si la fecha de control y la fecha del dataframe son iguales, escribir los datos
            archivo_salida.write(id_estacion+" "+nombre_estacion+" "+fecha_control.strftime("%Y%m%d")+str(hora_control)+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D1"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D2"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D3"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D4"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D5"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D6"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D7"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D8"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D9"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D10"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D11"][ind])+
"+"{:.0f}".format(matriz_toga["D12"][ind])+"\n")
        else:
            # Si la fecha de control aun no alcanza la fecha del dataframe, escribir la linea de datos nulos
            archivo_salida.write(id_estacion+" "+nombre_estacion+" "+fecha_control.strftime("%Y%m%d")+str(hora_control)+" 9999 9999 9999 9999 9999 9999 9999
9999 9999 9999 9999 9999\n")
        # Incrementar el indice del dataframe
        ind = ind + 1
        # Avanzar la fecha de control
        if hora_control == 1:
            hora_control = 2
        else:
            hora_control = 1
        fecha_control=fecha_control+timedelta(days=1)
# Cerrar el archivo de texto
archivo_salida.close()
print("Fin del analisis, se ha creado el archivo: completed-"+nombre_archivo)

```

Programa para graficar mediciones mensuales

(graficar_datos_por_mes.py)

```
from datetime import timedelta
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import datetime
import sys
import os

# Verificar que se haya pasado el n'umero correcto de par'ametros
if len(sys.argv) < 2:
    print("No se ha proporcionado el nombre del archivo a graficar")
    quit()

# Nombre del archivo
nombre_archivo = sys.argv[1]
print("Se va a cargar el archivo: "+nombre_archivo)

# Leer el archivo de datos y guardarlo en un dataframe de Pandas
matriz_toga = pd.read_table(nombre_archivo, delim_whitespace = True, names = ["StationID", "StationName", "Date", "D1", "D2", "D3", "D4", "D5", "D6", "D7",
"D8", "D9", "D10", "D11", "D12"], engine = 'python', skiprows = 1, na_values = "9999")

# Crear el 'indice que recorrer'a el dataframe
ind = 0;

# Realizar la gr'afica por mes
meses = ["01", "02", "03", "04", "05", "06", "07", "08", "09", "10", "11", "12"]
for mes in meses:
    # Crear las listas de fechas y datos
    lista_fechas=list()
    lista_datos=list()
    # Cargar la fecha de la columna correspondiente
    fecha = str(matriz_toga["Date"][ind])
    while fecha[4:6] == mes and ind < len(matriz_toga.index):
        # Crear la fecha inicial
        if fecha[8:9] == "1":
            fecha_inicial = datetime.datetime(int(fecha[:4]), int(fecha[4:6]), int(fecha[6:8]))
        else:
            fecha_inicial = datetime.datetime(int(fecha[:4]), int(fecha[4:6]), int(fecha[6:8]), 12)
        # Cargar los 12 datos
        for dat in ["D1", "D2", "D3", "D4", "D5", "D6", "D7", "D8", "D9", "D10", "D11", "D12"]:
            lista_fechas.append(fecha_inicial)
            lista_datos.append(matriz_toga[dat][ind])
            fecha_inicial = fecha_inicial + timedelta(hours=1)
        # Avanzar el indice
        ind = ind + 1
    # Cargar la nueva fecha si todavia hay datos
    if ind < len(matriz_toga.index):
        fecha = str(matriz_toga["Date"][ind])
    # Realizar la grafica del mes
    plt.figure(figsize=(20, 3), dpi=150)
    plt.plot(lista_fechas, lista_datos, "-b", linewidth=2)
    plt.title("Grafica del mes "+mes+" del archivo "+nombre_archivo)
    plt.xlabel("Fecha", fontweight='bold', fontsize=14)
    plt.ylabel("Nivel del mar (mm)", fontweight='bold', fontsize=14)
    plt.grid(True)
    plt.savefig(mes+"-"+os.path.splitext(nombre_archivo)[0]+".png")
print("Se ha finalizado la creacion de graficas.")
```

Apéndice C. Programa desarrollado para la etapa 2a de la metodología propuesta de control de calidad de mediciones de nivel del mar de la red del Servicio Mareográfico Nacional

Programa para el control de calidad automatizado (control_calidad_automatizado.py)

```
# Sistema de control de calidad automatico de datos de nivel del mar V1.0
# 'Ultima revisi'on: 8 de abril de 2021
# Autor: Octavio Gomez Ramos
from datetime import timedelta
import pandas as pd
import datetime
import sys

# Funci'on que determina si un anio es bisiesto o no
def es_bisiesto(anio):
    resto = anio % 4
    if resto == 0:
        resto = anio % 100
        if resto == 0:
            resto = anio % 400
            if resto == 0:
                return True
            else:
                return False
        else:
            return True
    else:
        return False

# Verificar que se haya pasado el n'umero correcto de par'ametros
if len(sys.argv) < 2:
    print("No se ha proporcionado el nombre del archivo a verificar")
    quit()

# Obtener el nombre del archivo de entrada a procesar de la lista de par'ametros
nombre_archivo = sys.argv[1]
print("Se va a cargar el archivo: "+nombre_archivo)

# Leer el archivo de datos y guardarlo en un dataframe de Pandas
matriz_toga = pd.read_table(nombre_archivo, delim_whitespace = True, names = ["StationID", "StationName", "Date", "D1", "D2", "D3", "D4", "D5", "D6", "D7", "D8", "D9", "D10", "D11", "D12"], engine = 'python', skiprows = 1, na_values = "9999")

# Obtener el anio del archivo
fecha = str(matriz_toga["Date"][0])
print("Se ha cargado el archivo "+nombre_archivo+" y se han encontrado datos del anio "+fecha[0:4]+".")
print("***** Inicio de la revision del archivo *****")
#####
# Revisi'on de numero correcto de l'ineas de datos#
#####
print("Comprobando que el archivo contenga el numero correcto de lineas de datos ",end = "")
# Calcular cu'antas lineas de datos se esperan
if es_bisiesto(int(fecha[:4])):
    dias_esperados=366*2
else:
    dias_esperados=365*2
if len(matriz_toga.index) == dias_esperados:
    print("[OK]")
else:
    print("[FAIL]")
    print("ERROR: se esperaban "+str(dias_esperados)+" lineas de datos y se han encontrado "+str(len(matriz_toga.index))+".")
    print("Favor de corregir este problema para poder realizar los procesos automatizados de control de calidad.")
    sys.exit(1)

#####
# Revisi'on del incremento cronol'ogico del tiempo #
#####
```

```

print("Comprobando que el tiempo se incremente cronologicamente en los datos ",end = "")
# Crear la fecha de control
fecha_control=datetime.datetime(int(fecha[:4]),1,1)
hora_control=1
dias_faltantes=0
dias_existentes=0
anio_final=int(fecha[:4])+1
ind = 0
# Generar una a una las fechas y compararlas con el dataframe
while fecha_control.year < anio_final:
    if ind < len(matriz_toga.index):
        # Cargar la fecha del dataframe
        fecha = str(matriz_toga["Date"][ind])
        # Verificar si la fecha de control y la fecha del dataframe son iguales
        if fecha != fecha_control.strftime("%Y%m%d")+str(hora_control):
            print("[FAIL]")
            print("ERROR: El tiempo no se incrementa cronologicamente en los datos, se esperaba la fecha "+fecha_control.strftime("%Y%m%d")+str(hora_control)+"
y se ha encontrado la fecha "+fecha+"")
            print("Favor de corregir este problema para poder realizar los procesos automatizados de control de calidad.")
            sys.exit(1)
        # Incrementar el indice del dataframe
        ind = ind + 1
        # Avanzar la fecha de control
        if hora_control == 1:
            hora_control = 2
        else:
            hora_control = 1
        fecha_control=fecha_control+timedelta(days=1)
    if fecha_control.year == anio_final:
        print("[OK]")
    else:
        print("[FAIL]")
        print("ERROR: El tiempo no se incrementa cronologicamente en los datos")
        print("Favor de corregir este problema para poder realizar los procesos automatizados de control de calidad.")
        sys.exit(1)

#####
# Detecci'on de caracteres inv'alidos #
#####
print("Detectando si las columnas de datos contienen caracteres invalidos ",end = "")
# Verificar si alguna columna de datos contiene valores no num'ericos
if str(matriz_toga["Date"].dtypes) == "object" or str(matriz_toga["D1"].dtypes) == "object" or str(matriz_toga["D2"].dtypes) == "object" or
str(matriz_toga["D3"].dtypes) == "object" or str(matriz_toga["D4"].dtypes) == "object" or str(matriz_toga["D5"].dtypes) == "object" or
str(matriz_toga["D6"].dtypes) == "object" or str(matriz_toga["D7"].dtypes) == "object" or str(matriz_toga["D8"].dtypes) == "object" or
str(matriz_toga["D9"].dtypes) == "object" or str(matriz_toga["D10"].dtypes) == "object" or str(matriz_toga["D11"].dtypes) == "object" or
str(matriz_toga["D12"].dtypes) == "object":
    print("[FAIL]")
    print("ERROR: Se han detectado las siguientes columnas de datos que contienen valores no numericos: ",end = "")
    for colname in ["Date", "D1", "D2", "D3", "D4", "D5", "D6", "D7", "D8", "D9", "D10", "D11", "D12"]:
        if matriz_toga[colname].dtypes == "object":
            print(colname+" ",end = "")
    print("\nFavor de corregir este problema para poder realizar los procesos automatizados de control de calidad.")
else:
    print("[OK]")

#####
# Crear el array de fechas, valores y etiquetas a partir del dataframe #
#####

lista_fechas = list()
lista_datos = list()
lista_etiquetas = list()
ind = 0
# Recorrer todo el dataframe
while ind < len(matriz_toga.index):
    # Cargar la fecha de la columna correspondiente
    fecha = str(matriz_toga["Date"][ind])

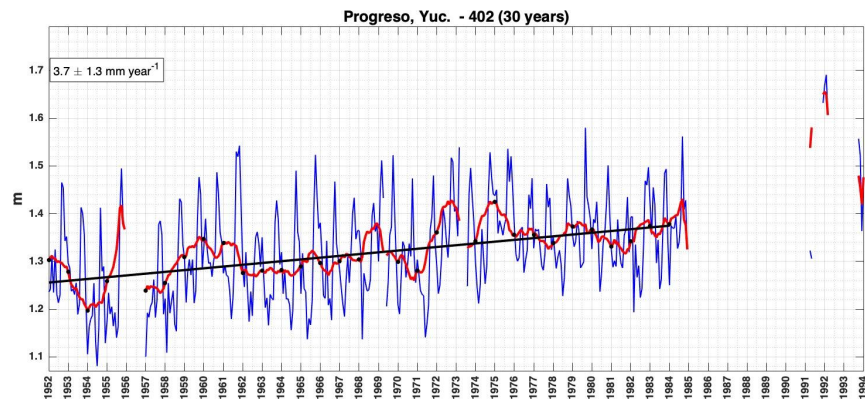
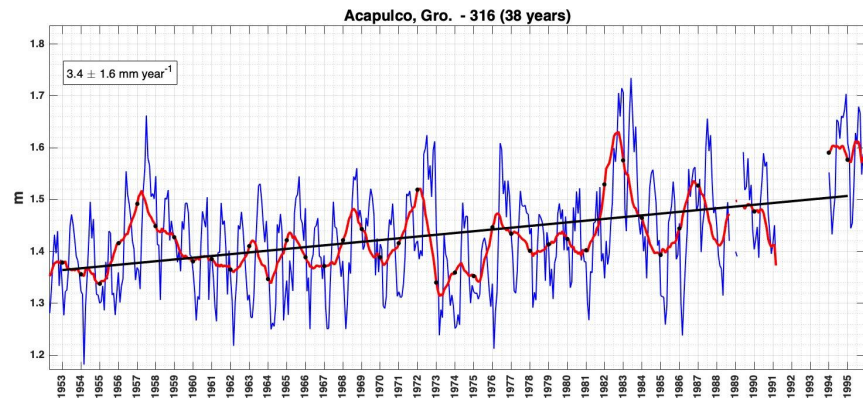
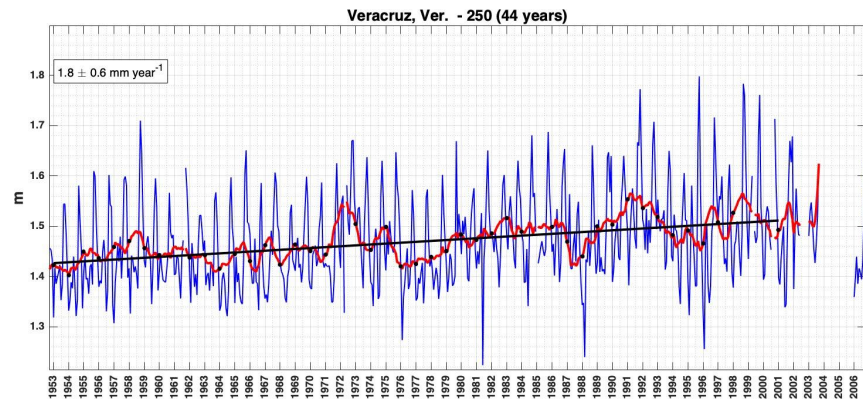
```

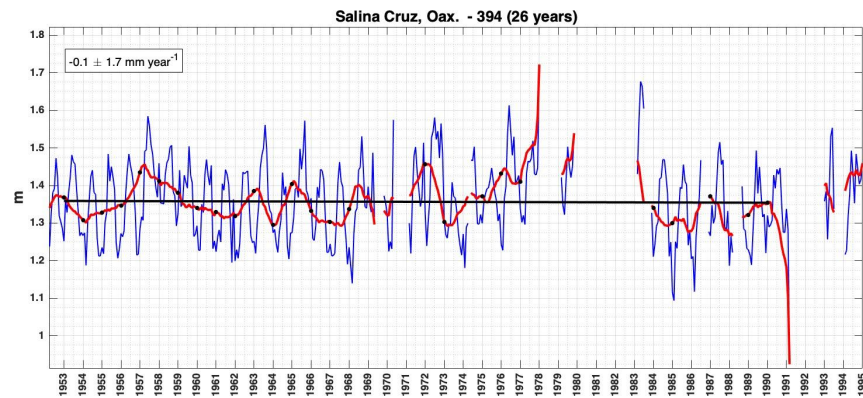
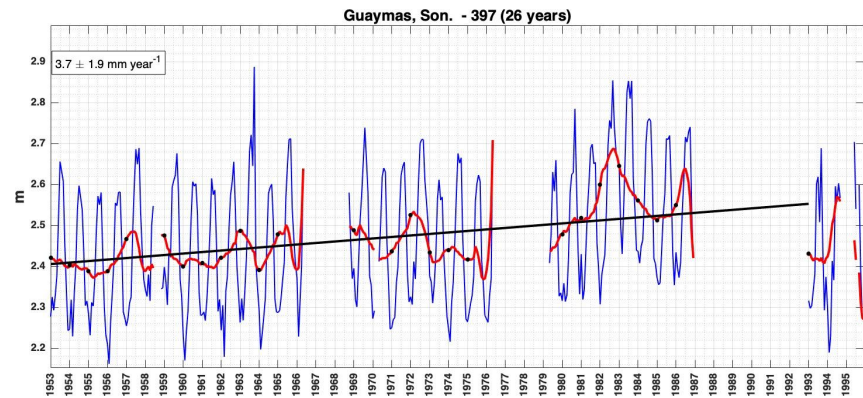
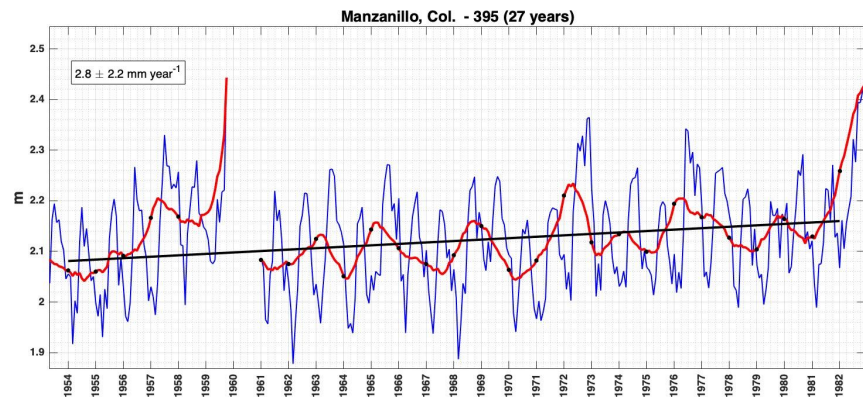
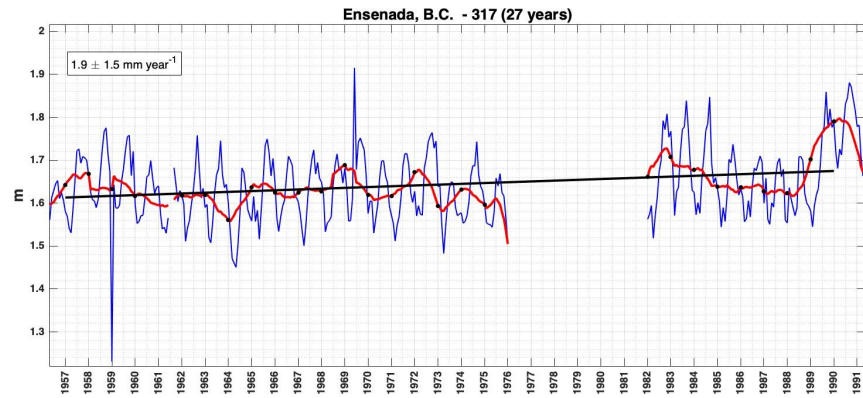
```

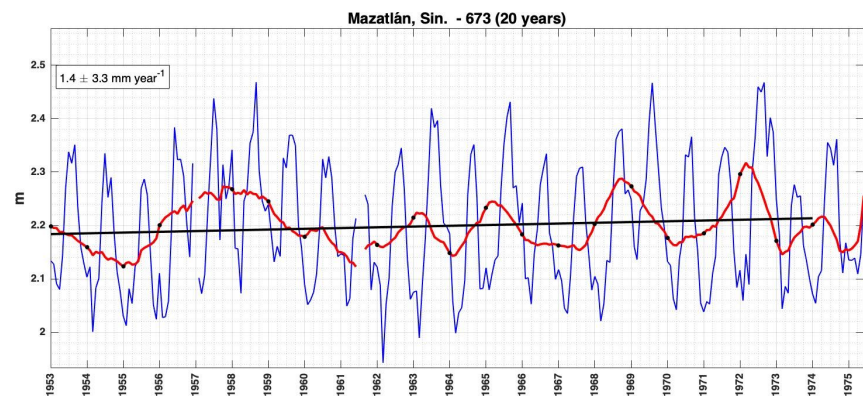
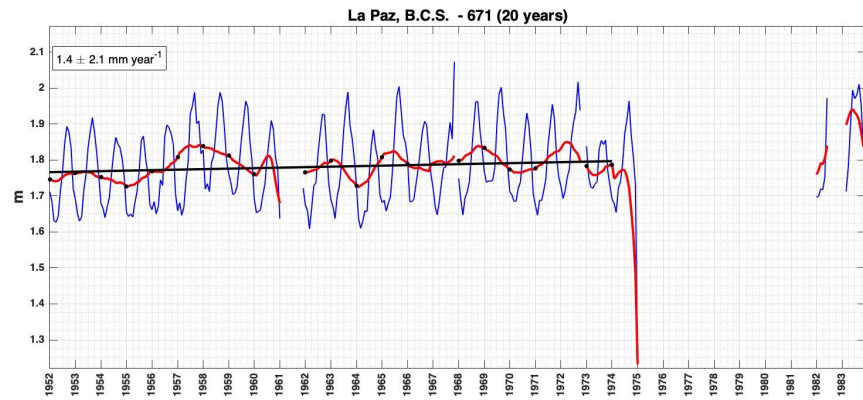
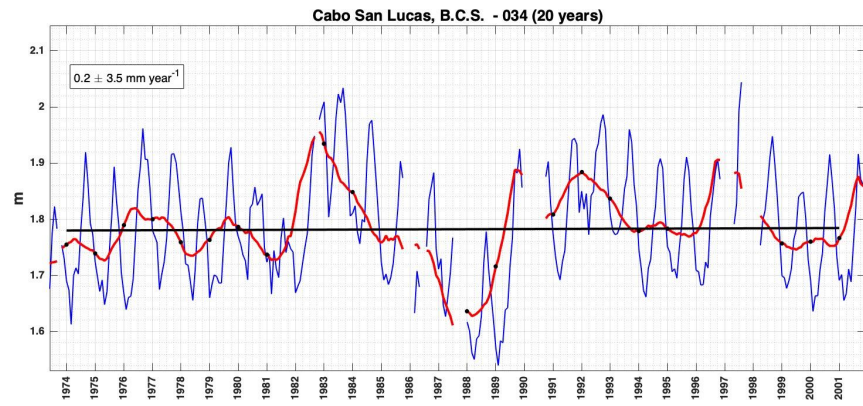
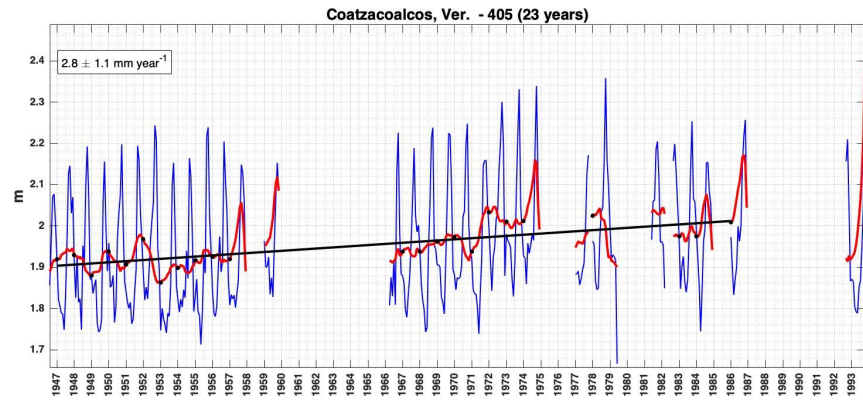
# Crear la fecha inicial
if fecha[8:9] == "1":
    fecha_inicial = datetime.datetime(int(fecha[:4]), int(fecha[4:6]), int(fecha[6:8]))
else:
    fecha_inicial = datetime.datetime(int(fecha[:4]), int(fecha[4:6]), int(fecha[6:8]), 12)
# Cargar los 12 datos
for dat in ["D1", "D2", "D3", "D4", "D5", "D6", "D7", "D8", "D9", "D10", "D11", "D12"]:
    lista_fechas.append(fecha_inicial)
    lista_datos.append(matriz_toga[dat][ind])
    lista_etiquetas.append(0)
    fecha_inicial = fecha_inicial + timedelta(hours=1)
# Avanzar el 'indice
ind = ind + 1
#####
# Prueba de l'inea recta #
#####
print("Realizando prueba de estabilidad (linea recta)")
stuckcount = 0
stuckvalue = lista_datos[0]
# Recorrer todo el arreglo de datos
for ind in range(len(lista_datos)):
    # Comenzar a partir del segundo dato
    if ind > 0:
        # Verificar si el dato que se está revisando actualmente no es igual al stuckvalue
        if stuckvalue == lista_datos[ind]:
            stuckcount = stuckcount + 1
        else:
            stuckvalue == lista_datos[ind]
            stuckcount = 0
        if stuckcount > 1:
            # Etiquetar el stuckvalue actual
            print("---Se han encontrado y etiquetado valores iguales consecutivos (stuck values).")
            lista_etiquetas[ind]=3
            # Si se trata de los primeros tres valores, etiquetar los dos valores previos
            if stuckcount == 2:
                lista_etiquetas[ind-1]=3
                lista_etiquetas[ind-2]=3
#####
# Prueba de valor fuera de rango #
#####
# Nota, esta prueba 'unicamente se realiza si el usuario ha proporcionado el rango a verificar
if len(sys.argv) > 2:
    print ("El usuario ha proporcionado un rango de valores a verificar, se hará la prueba de rango.")
    # Obtener el rango proporcionado por el usuario
    rinf = float(sys.argv[2])
    rsup = float(sys.argv[3])
    # Recorrer todo el arreglo de datos y verificar si los valores se encuentran en rango
    for ind in range(len(lista_datos)):
        if lista_datos[ind] < rinf or lista_datos[ind] > rsup:
            lista_etiquetas[ind] = 4
            print("El valor "+str(lista_datos[ind])+" ha sido etiquetado como fuera de rango.")
#####
# Escribir el archivo de texto de datos etiquetados #
#####
print("Se va a proceder a escribir el archivo de salida con los datos etiquetados.")
# Crear el archivo de salida etiquetado
archivo_salida = open("labeled-"+nombre_archivo, 'w+')
# Recorrer el arreglo de datos para escribirlo en un archivo de texto
for ind in range(len(lista_datos)):
    archivo_salida.write(lista_fechas[ind].strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")+ " "+str(lista_datos[ind])+" "+str(lista_etiquetas[ind])+"\n")
# Cerrar el archivo de texto
archivo_salida.close()
print("Se ha creado el archivo de salida etiquetado labeled-"+nombre_archivo+".")
print("***** Fin de la revision del archivo *****")

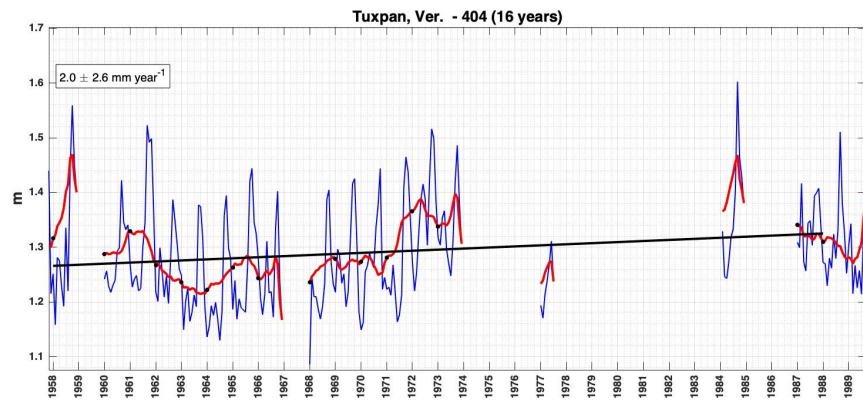
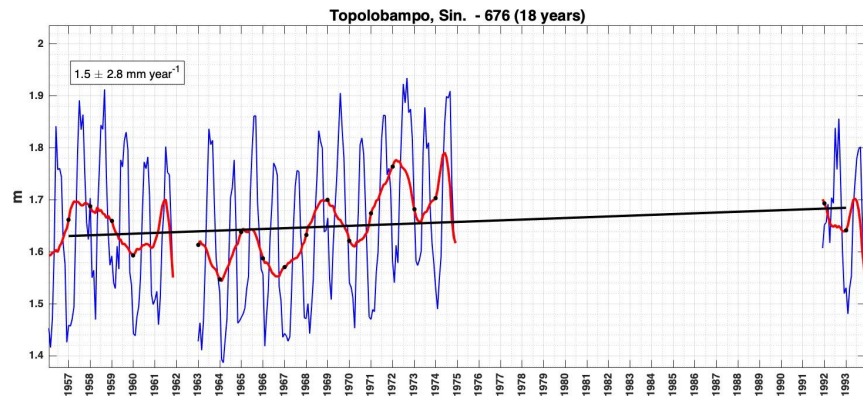
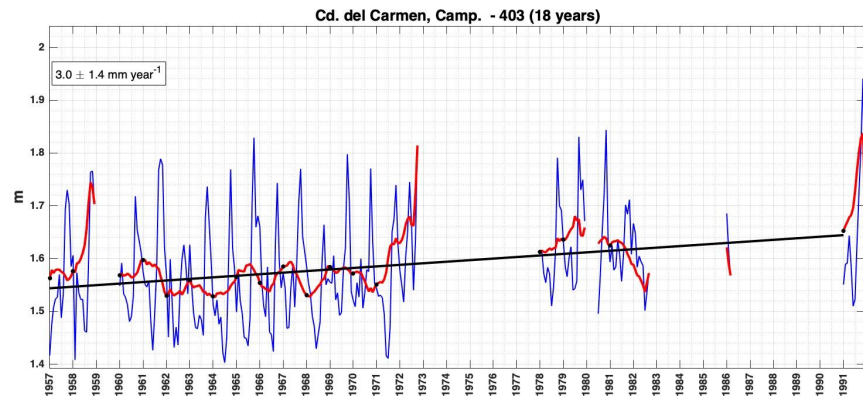
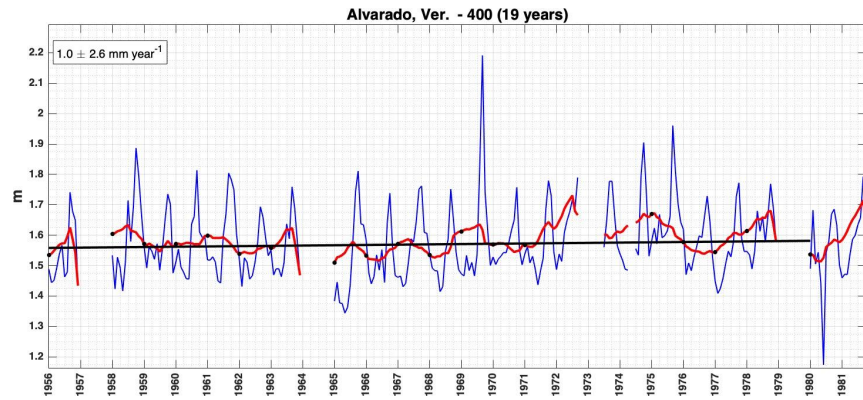
```

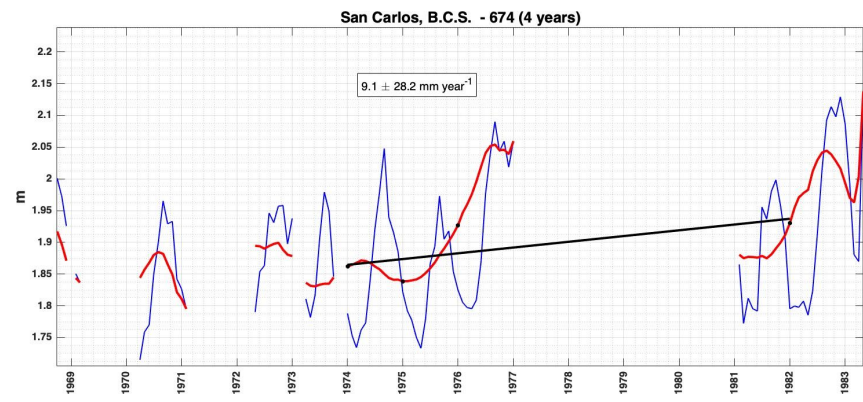
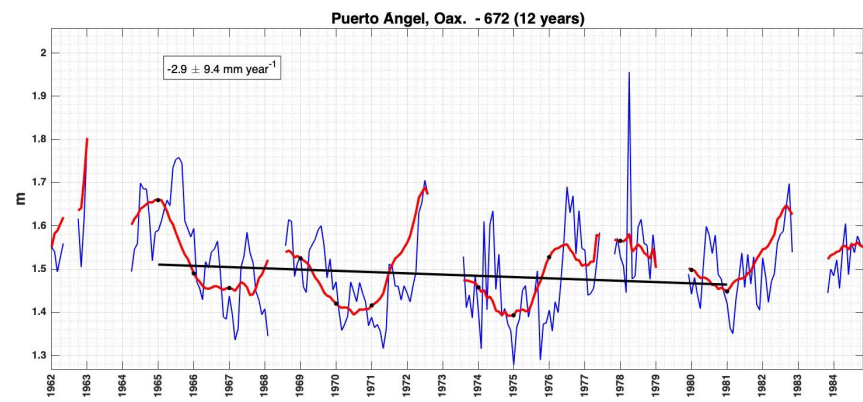
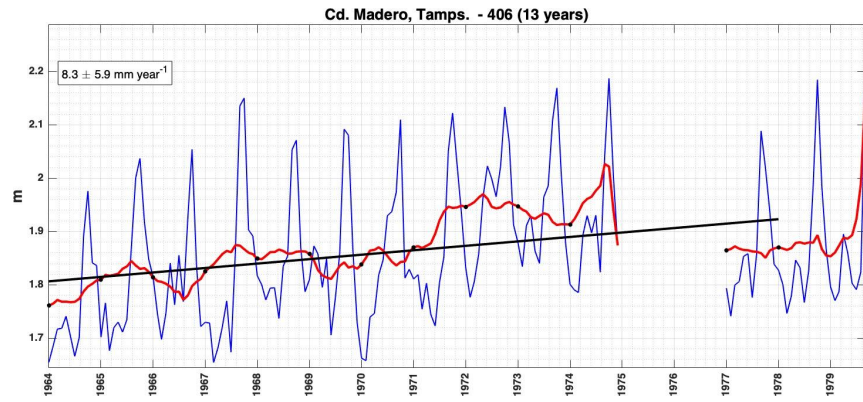
Apéndice D. Gráficas con la tendencia lineal estimada para los 18 sitios analizados. Se muestran ordenados de forma descendente por el número de años completos











Apéndice E. Gráficas con la tendencia lineal preliminar estimada para estaciones que tienen datos actuales.

