

Utilización de datos satelitales para la evaluación y mejora de los pronósticos
numéricos en alta resolución a muy corto plazo

A Thesis
Presented to
The Division of Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires

In Partial Fulfillment
of the Requirements for the Degree
Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en
el área de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

Paola Corrales

Algún momento de marzo 2023?

Approved for the Division
(Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos)

Victoria Galligani

Juan Ruiz

Acknowledgements

I want to thank a few people.

Preface

This is an example of a thesis setup to use the reed thesis document class (for LaTeX) and the R bookdown package, in general.

Table of Contents

Introducción	1
0.1 Pronostico de eventos severos	1
0.2 Asimilación de datos como posible solución	2
0.3 Resultados previos de asimilación de distintas fuentes de observaciones	5
0.3.1 Asimilación de radianzas de satélites	6
0.4 Asimilación de datos en Sudamérica	9
0.5 Motivación y objetivos	10
 Chapter 1: Metodología	 11
1.1 El sistema de asimilación GSI	11
1.2 Caso de estudio	11
1.3 Configuración del ensamble	12
1.4 Verificación: obs y metricas	14
1.4.1 Conjunto de datos de validación	14
1.4.2 Métodos de verificación	15
1.5 Recursos computacionales	17
 Chapter 2: Asimilacion de observaciones de estaciones meteorológicas automáticas, vientos derivados de satélite y radianzas de satelites polares	 19
2.1 Presentación y metodología	19
2.1.1 Observaciones asimiladas	19
2.1.2 Configuracion de los experimentos	19
2.2 Resultados	19
2.2.1 Ensamble	19
2.2.2 Impacto en el analisis	19
2.2.3 Verificacion	19
2.2.4 Conclusiones	19

Chapter 3: Graphics, References, and Labels	21
3.1 Figures	21
3.2 Footnotes and Endnotes	24
3.3 Bibliographies	24
3.4 Anything else?	26
Conclusion	27
Appendix A: The First Appendix	29
Appendix B: The Second Appendix, for Fun	33
References	35

List of Tables

List of Figures

1	Esquema de un ciclo de asimilación típico. El tiempo de las observaciones y el campo preliminar deberá coincidir.	2
1.1	Serie de imagenes del canal 13 (10.3 mu) del satellite GOES-16 para las a) 00 UTC, b) 06 UTC, c) 12 UTC, d) 18 UTC del 22 de noviembre de 2018 y e) 00 UTC y f) 06 UTC del 23 de novimebre de 2018.	12
1.2	a) Dominio utilizado para las simulaciones (recuadro negro), dominio interior utilizado para la comparación entre experimentos (recuadro rojo), la región mostrada en b) (recuadro azul claro), y la ubicación de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA, cuadrados verdes) y las Estaciones Meteorológicas Convencionales (EMC, triángulos naranjas). b) Ubicación de los lanzamientos de radiosondeos durante RELAM-PAGO. Los puntos verdes corresponden a los radiosondeos lanzados durante el IOP 7, los triángulos naranjas son radiosondeos lanzados durante el IOP 8, y los cuadrados morados son radiosondeos lanzados fuera de los periodos de medición intensiva. También se muestra la topografía en metros (sombreada).	14
3.1	Reed logo	21
3.2	Mean Delays by Airline	23
3.3	Subdiv. graph	24
3.4	A Larger Figure, Flipped Upside Down	24

Abstract

The preface pretty much says it all.

Second paragraph of abstract starts here.

Dedication

You can have a dedication here if you wish.

Introducción

0.1 Pronostico de eventos severos

La simulación numérica de la atmósfera, es decir, la integración de las ecuaciones que rigen la evolución del sistema atmosférico es la base para la predicción del tiempo en diversas escalas temporales desde horas a semanas.

La predicción de fenómenos meteorológicos extremos es de particular importancia ya que pueden producir cuantiosas pérdidas humanas y materiales. En Argentina, una gran cantidad de estos fenómenos están asociados a la ocurrencia de convección profunda entre los que se cuentan tornados, ráfagas intensas, precipitaciones extremas en cortos períodos de tiempo, granizo de gran tamaño y actividad eléctrica. Es por tal motivo necesario avanzar en el conocimiento de estos fenómenos y en la capacidad de pronosticar la ocurrencia de los mismos.

Si se cuenta con condiciones de borde apropiadas, es decir, una correcta representación de las características de la superficie terrestre y el tope de la atmósfera, la integración de un modelo atmosférico es un problema de condiciones iniciales. La generación de pronósticos de calidad dependerá entonces, de la capacidad del modelo para representar los procesos atmosféricos y la exactitud de las condiciones iniciales usadas (Kalnay, 2002).

El pronóstico de los fenómenos severos es a su vez un desafío científico y tecnológico muy complejo debido a la predictibilidad limitada en la mesoescala y debido a la dificultad de conocer o diagnosticar el estado de la atmósfera en escalas espaciales pequeñas y tiempos cortos (por ejemplo de 1 a 10 km y del orden de los minutos).

Uno de los métodos que pueden utilizarse para el pronóstico de fenómenos meteorológicos severos es la utilización de modelos numéricos de la atmósfera que resuelvan explícitamente la convección profunda. Diversos estudios, han comprobado que estos modelos agregan valor al pronóstico a corto plazo y que en muchos casos proveen información sobre el modo de organización de las celdas convectivas y su intensidad (Aksoy et al., 2010; Stensrud et al., 2013). No obstante, la capacidad de los modelos

numéricos en anticipar la ubicación y tiempo de ocurrencia de eventos extremos asociados a convección es muy limitada si no se cuenta con una detallada información sobre el estado de la atmósfera en la escala de las tormentas en el momento en el que se inician los pronósticos numéricos (Clark et al., 2009).

0.2 Asimilación de datos como posible solución

Por otro lado es posible aplicar técnicas de asimilación de datos para generar una mejor estimación de las condiciones iniciales necesarias para integrar un modelo numérico. La asimilación de datos combina de manera optima un pronóstico numérico o campo preliminar en un tiempo t con las observaciones disponibles para ese mismo tiempo, generando un análisis. Esta combinación optima toma en cuenta el error asociado a al modelo meteorológico (errores de pronóstico) y el error de las observaciones (instrumental, de representatividad) y si ambos tienen una distribución Gaussiana, el error resultante será menor a los errores originales. Por esta razón el análisis es considerado la *mejor aproximación* disponible del estado real de la atmósfera.

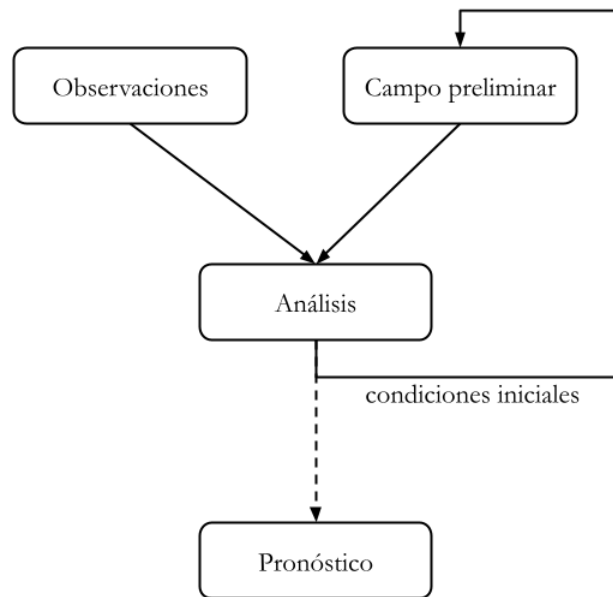


Figure 1: Esquema de un ciclo de asimilación típico. El tiempo de las observaciones y el campo preliminar deberá coincidir.

En el caso de modelos globales, típicamente cada ciclo de asimilación de 6 horas utiliza el campo preliminar previo, es decir el pronóstico a 6 horas inicializado a partir del análisis anterior y las observaciones disponibles para las 6 horas previas o en

un periodo similar centrado en la hora del análisis. Para poder comparar el campo preliminar con las observaciones, este es interpolado a la ubicación de las observaciones. En determinados casos, por ejemplo cuando se trabaja con observaciones de satélite o radar), será necesario transformar las variables del modelo para obtener las variables observadas. En la siguiente ecuación H es el operador de las observaciones que se encarga de las interpolaciones y transformaciones necesarias sobre el campo preliminar x_b .

$$x_a = x_b + W[y_o - H(x_b)] \quad (1)$$

La diferencia entre las observaciones y_o y el campo preliminar se denomina innovación. El análisis x_a se obtiene aplicando las innovaciones al campo preliminar teniendo en cuenta un peso W que incluye información sobre los errores del pronóstico y de las observaciones.

Existen diferentes metodologías para obtener x_a . Los métodos variacionales, 3D-Var y 4D-Var, definen una función de costo que es proporcional a la distancia entre el análisis y simultaneamente, el campo preliminar y las obvservaciones. Esta función de costo J es minimizada para obtener el análisis.

$$J = \frac{1}{2}[y_o - H(x_a)]^T R^{-1}[y_o - H(x_a)] + (x_a - x_b)^T B^{-1}(x_a - x_b) \quad (2)$$

En la ecuación (2), el primer término corresponde a la distancia entre el campo del análisis y las observaciones, pesado por la covarianza de los errores de las observaciones R . El segundo término a la distancia entre el campo del análisis y el campo preliminar pesado por la covarianza de los errores del pronóstico B . Para el caso más simple, es decir, una variable de modelo y una observación, R y B son escalares. Para el caso multidimensional, serán matrices de covarianza de dimension n (número de observaciones) que deben ser estimadas. Las ecuaciones (1) y (2) son equivalentes si H es un operador lineal y si se define a W como:

$$W = B H^T (H B H^T + R^{-1})^{-1} \quad (3)$$

El método 4D-Var extiende el uso del método 3D-Var para incluir la distancia a las observaciones que pueden estar distribuidas temporalmente dentro de la ventana de asimilación en la misma función de peso. Sin embargo minimizar la función de costo requiere desarrollar el modelo tangente lineal y su adjunto, lo que puede ser costoso cuando se trabaja con modelos no lineales. Por esta misma razón, obtener la matriz B es un problema complejo y en general se la asume constante en el tiempo.

Los métodos secuenciales y en particular el filtro de Kalman extendido, actualizan el análisis a medida que las observaciones están disponibles. Este método tiene la ventaja de actualizar la matriz B junto con el análisis. En este caso la matriz W toma el nombre de K o ganancia de Kalman y se actualiza en cada ciclo de asimilación t_i .

$$K_i = B(t_i)H^T(HB(t_i)H^T + R^{-1})^{-1} \quad (4)$$

La estimación de B utilizando el filtro de Kalman extendido es particularmente costosa en terminos computacionales por lo que en la práctica se utiliza el filtro de Kalman por ensambles o EnKF. Un ensamble consiste en un conjunto de simulaciones ligeramente diferentes que se resuelven simultaneamente para incluir los posibles estados de la atmósfera y provee información dependiente de la dinámica durante la ventana de asimilación. A partir del ensamble, la matriz B se estima como:

$$B \approx \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (x_b^k - \bar{x}_b)(x_b^k - \bar{x}_b)^T \quad (5)$$

donde $k \in [1, m]$ el miembro k -ésimo del ensamble. Esta estimación será buena si el ensamble logra capturar los posibles estados futuros o en otras palabras el spread que acompañe los cambios en la incertidumbre de los pronosticos a lo largo de los ciclos de asimilación. Sin embargo, este método no es aplicable a menos que el tamaño del ensamble sea comparable a los grados de libertad de un modelo que resuelve 10^9 variables de estado, lo que resulta computacionalmente inviable.

El método Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) busca resolver los problemas anteriores restringiendo el área de influencia de las observaciones a un determinado radio de localización reduciendo el costo computacional necesario. Además, calcula el análisis para cada punto de retícula uno a uno, incorporando todas las observaciones que puedan tener influencia en ese punto al mismo tiempo. De esta manera este método es hasta un orden de magnitud más rápido comparado con otros métodos desarrollados previamente (Whitaker et al., 2008).

Independientemente de la metodología aplicada, el modelo cumple un rol fundamental en la asimilación de datos ya que *transporta* información de regiones donde existe mucha información disponible (por ejemplo, los continentes) a regiones donde las observaciones son escasas (zonas oceánicas) manteniendo los balances físicos que rigen los procesos atmosféricos.

0.3 Resultados previos de asimilación de distintas fuentes de observaciones

Para que los métodos de asimilación de datos tengan éxito, deben utilizarse redes de observación con suficiente resolución temporal y espacial capaces de captar la variabilidad en las escalas que se quieren resolver, por ejemplo, la mesoescala.

Wheatley and Stensrud (2010) investigó el impacto de la asimilación de datos de presión de superficie en un sistema de asimilación de datos basado en conjuntos de mesoescala, pero encontró un impacto limitado en dos estudios de caso relacionados con sistemas convectivos de mesoescala. Ha and Snyder (2014) demostró que la asimilación de la temperatura y la temperatura del punto de rocío de las redes de estaciones meteorológicas de superficie de alta resolución mejoraba sistemáticamente la estructura de la capa límite planetaria simulada y mejoraba la previsión de precipitaciones de corto alcance sobre los Estados Unidos. Chang et al. (2017), Bae and Min (2022) y Chen et al. (2016) informaron sobre los efectos beneficiosos de la asimilación de observaciones de estaciones meteorológicas de superficie en un sistema de asimilación de datos de alta resolución utilizando las metodologías de EnKF, 3D-Var y 4D-Var, respectivamente, encontrando impactos positivos en el pronóstico de la temperatura y la humedad en la capa límite planetaria y en la localización de los sistemas de precipitación. Sobash and Stensrud (2015) demostró en un sistema de asimilación de datos de mesoescala que el impacto sobre la iniciación de la convección y el pronóstico de la precipitación de corto alcance es positivo si los datos se asimilan con frecuencia (en el orden de minutos, en lugar de en el orden de horas). Maejima et al. (2019) investigó el impacto de la asimilación con frecuencia de 1 minutos de observaciones sintéticas en un caso de precipitación intensa, encontrando que la asimilación de observaciones de alta frecuencia y espacialmente espaciales densas conducen a una mejor representación de la circulación de mesoescala aunque el número de observaciones proporcionadas por las estaciones de superficie es mucho menor que el proporcionado por los radares meteorológicos. Gasperoni et al. (2018) realizó un estudio de caso para evaluar el impacto de la asimilación de las observaciones producidas por estaciones meteorológicas privadas que no se incorporan a los análisis operativos globales. Encontró un efecto positivo al asimilar estas observaciones sobre el inicio de la convección húmeda profunda a lo largo de una línea seca. Este resultado es especialmente importante para regiones con pocos datos, como el sur de Sudamérica, donde las redes operativas no son lo suficientemente densas como para captar los detalles de la mesoescala. En ese sentido, Dillon et al. (2021) intentó utilizar por

primera vez observaciones de estaciones meteorológicas automáticas de redes privadas en el sur de Sudamérica, sin embargo, la contribución específica de este tipo de observaciones sobre esta región, no ha sido investigada hasta ahora.

Se ha investigado el impacto de otros tipos de observaciones de resolución espacial y temporal relativamente alta, como observaciones de satélites, en el contexto de la asimilación de datos de mesoescala. Estas observaciones incluyen radianzas y productos derivados, Wu et al. (2014), Cherubini et al. (2006) y Sawada et al. (2019) observaron un impacto positivo de la asimilación de viento derivado de información satelital de alta frecuencia en un estudio de caso de un ciclón tropical utilizando un sistema de asimilación de datos basado en ensambles. Por otro lado, Gao et al. (2015) encontró un impacto positivo en la asimilación de viento estimado a partir de las observaciones de satélites geoestacionarios.

0.3.1 Asimilación de radianzas de satélites

Uno de los objetivos y aporte original de este trabajo es la asimilación de radianzas para aplicaciones de mesoescala, por lo que en esta sección se resumirá los avances en la asimilación de estas observaciones a nivel global y regional.

Los primeros satélites de orbita polar en proveer información meteorológica fueron desarrollados en las décadas de los 60 y 70. Incluían sensores infrarrojos y de microondas para monitorear la temperatura y humedad. Hacia finales de la década de los 70, Estados Unidos, Europa y Japón ya habían lanzando los primeros satélites geoestacionarios. Pocos años después este tipo de observaciones se incorporaban al Sistema de Observación Global (Global Observing System en inglés).

El primer conjunto de satélites compuesto por los sensores HIRS, MSU y SSU (sistema TOVS) podían cubrir el globo completo cada 12 hs. Si bien cada uno de estos sensores generaba información complementaria en la tropósfera y baja estratósfera, la resolución horizontal y vertical era limitada. En particular HIRS, un sensor infrarrojo tiene una resolución horizontal de 40 km, mientras que MSU y SSU, sensores sensibles en las microondas, tiene una resolución de 160 y 200 km respectivamente. En la vertical, la función de peso de los distintos canales ronda entre los 5 y 10 km y aún en los casos donde los canales se solapan, la resolución apenas alcanza los 3 km.

Las primeras pruebas de asimilación de observaciones de satélites fueron desarrolladas principalmente en Australia, motivadas particularmente por la escases de observaciones en el hemisferio sur. Kelly et al. (1978) mostró una importante mejora en pronósticos a 24 horas de altura geopotencial entre 1000 y 200 hPa cuando se

asimilaba de manera continua perfiles de temperatura derivados del satélite Nimbus-6, conocidos también como retrievals. A nivel global Ohring (1979) resumen los avances de la década indicando los impactos son positivos aunque pequeños y que la mayor mejora se observa en los pronósticos en el hemisferio sur. Al mismo tiempo Ohring (1979) señala algunos de los posibles problemas asociados, por ejemplo la baja resolución vertical de los perfiles de las distintas variables y problemas en la generación de los mismos.

A principios de los 80 los centros de pronóstico mundiales continuaron estudiando la posibilidad de asimilar observaciones satelitales obteniendo resultados similares y tomando una mejora en la calidad de los perfiles de temperatura generados (Eyre et al., 2020). En particular el ECMWF Seminar on Data Assimilation Systems and Observing System Experiments concluye que la asimilación de estas observaciones cumple un rol importante en el análisis de sistemas meteorológicos de larga escala en latitudes medias y altas, y en particular en el hemisferio sur. Sin embargo, hacia finales de los 80, los modelos de pronóstico habían mejorado sustancialmente haciendo que el potencial impacto de observaciones erróneas u observaciones asimiladas de manera incorrecta degradaran sustancialmente el pronóstico particularmente en el hemisferio norte. Andersson et al. (1991) mostró que los incrementos en el análisis presentaba patrones con importante sesgo cuando se asimilaba retrievals de TOVS.

Eyre et al. (2020) explica que la principal razón por la que los resultados obtenidos no fuera bueno era que se trataba a los retrievals como “sondeos de baja calidad” sin tener en cuenta las características particulares de las observaciones de satélite.

En la década de los 90, luego de que los centros de asimilación comenzaran a utilizar técnicas avanzadas de asimilación de datos como 3D-Var, se dieron las condiciones necesarias para asimilar radianzas de satélites de manera directa. Sin embargo, la correcta asimilación de estas observaciones depende de 3 factores, que las observaciones no tengan sesgo, que sus errores tengan una distribución Gaussiana y que el problema no es afectado fuertemente por procesos no lineales (Eyre et al., 2022). Para asegurar estas condiciones fue necesario el desarrollo de técnicas de detección de nubes que permitan filtrar las regiones afectadas por nubosidad, principalmente para observaciones de sensores infrarrojos. Otro importante avance fue el desarrollo de modelos de transferencia radiativa que pudieran transformar el campo preliminar en radianzas comparables con las observaciones en tiempos razonables para ser usados de manera operativa. Finalmente, el desarrollo de métodos de corrección del bias de radianzas aplicados directamente en el proceso de asimilación fue determinante para la asimilación directa de este tipo de observaciones.

Justo al desarrollo de la asimilación de radianzas, también continuó el desarrollo de nuevos sensores, como la serie AMSU-A y AMSU-B y el sistema ATOVS (Advance TOVS) que cuenta con mayores canales y por lo tanto una mayor resolución vertical. Posteriormente el desarrollo de los sensores multiespectrales como IASI y AIRS permitieron obtener información con mayor resolución vertical al contar con más de 3000 canales en la región infrarroja del espectro electromagnético.

Una parte importante del desarrollo la asimilación de datos en los últimos 20 años tiene que ver con el desarrollo de metodologías que tengan en cuenta la influencia de la superficie y la interacción entre las nubes y la energía electromagnética para los distintos canales infrarrojo y microondas. Inicialmente solo se asimilaron observaciones sobre agua y durante cielos despejados. Sin embargo mejoras en los modelos de transferencia radiativa respecto del tratamiento de los distintos tipos de superficie y la representación y tratamiendo de las nubes permiten en la actualidad incorporar observaciones que usualmente no podrían asimilarse.

Mientras que la asimilación directa de radianzas en modelos globales está establecida y estudiada [], la las aplicaciones en modelos regionales, sin embargo, sigue siendo un desafío debido a la escasa cobertura de las observaciones debido a la órbita de los satélites, la corrección del sesgo y el tope de la atmósfera bajos usados en modelos regionales. Bao et al. (2015) estudió el impacto de la asimilación de datos de radiancia de microondas e infrarrojo en el pronóstico de temperatura y humedad en el oeste de EE.UU. y encontró una reducción del sesgo de la temperatura en niveles bajos y medios como resultado de las observaciones de microondas, pero un efecto opuesto cuando se asimilaban radianzas en el infrarrojo. Más recientemente, Zhu et al. (2019) estudió el impacto de la asimilación frecuente de radiancias de satélites para un sistema regional y mostró una mejora para todas las variables, en particular para la humedad relativa en los niveles superiores. Wang and Randriamampianina (2021) estudiaron el impacto de la asimilación de radiancias en el Reanálisis Regional Europeo Copernicus de alta resolución e informaron de que las observaciones de radiancia de satélite tuvieron un impacto neutro en los análisis de la altura geopotencial en la tropósfera baja, mientras que el impacto fue ligeramente negativo para la tropósfera superior y estratosfera. También observaron resultados similares para pronósticos a 3 hs inicializados a partir del análisis, pero un impacto positivo en las previsiones de mediano plazo (12 y 24 hs). Teniendo en cuenta los variados resultados, es necesario continuar estudiando la utilidad de asimilar las observaciones de radiancia en un sistema de asimilación de datos de área limitada sobre tierra. El estudio de la asimilación de radianzas a nivel regional cobra aún mayor importancia en Sudamérica ya que no se conocen estudios

realizados previamente.

0.4 Asimilación de datos en Sudamérica

La historia de la asimilación de datos en Sudamérica y en particular en Argentina es relativamente corta. A principios de la década del 90 Vera (1992) en su tesis doctoral desarrolló un Sistema de Asimilación de Datos Intermitente que utilizaba la interpolación optima en un modelo cuasigeostrófico en la región sur de Sudamérica. Algunos años después, en 1997, el Servicio Meteorológico Nacional se implementó un análisis utilizando el método de Cressman en un modelo de 10 niveles verticales (García Skabar, 1997).

Por otro lado el Centro de Pronóstico del Tiempo y Estudios Climáticos (CPTEC) de Brazil desarrollo un sistema de asimilación de datos global que utiliza el sistema Gridpoint Statistical Interpolation (GSI) en conjunto con su modelo global BAM y posteriormente aplicaciones regionales utilizando el modelo WRF en conjunto con el sistema de asimilación GSI. En particular, Goncalves de Goncalves et al. (2015) mostró experimentos realizados en el CPTEC usando el sistema de asimilación de datos regional para simulaciones de 12, 0 y 3 kilometros durante un mes. Ferreira et al. (2017), Bause Machado et al. (2017), Toshio Inouye et al. (2017), Vendrasco et al. (2020), Ferreira et al. (2020) tambien mostraron resultados positivos al aplicar asimilación de datos en aplicaciones regionales sobre Brasil con resoluciones de entre 1 y 10 km.

En los últimos años, se documentaron importantes avances asociados a asimilación de datos en Argentina. Por ejemplo Marcos Saucedo realizó un estudio teórico de asimilación de datos utilizando LETKF acomplado al modelo WRF donde mostró con experimentos idealizados mejoras en la calidad del análisis aún cuando se asimilaban pocas observaciones. Posteriormente Maria Eugenia Dillon avanzó en su tesis de doctorado en el desarrollo de un sistema de asimilación de datos reales y concluyó que la implementación de un ensamble multifísica que considere los posibles errores del modelo y la inclusión de retrievals de temperatura y humedad en la asimilación tienen un impacto positivo en los análisis y pronósticos. Más recientemente, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en conjunto con el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera desarrollaron y probaron el sistema de asimilación de actualización rápida LETKF-WRF de manera operativa durante la campaña de investigación RELAMPAGO (Nesbitt et al., 2021). El sistema incorporó observaciones convencionales, retrievals de satélites multiespectrales y viento derivado de observaciones satelitales y observaciones

de radar de manera horaria y generó pronósticos a 36 hs cada 3 hs. Dillon et al. (2021) mostraron que el pronóstico inicializado a partir de los análisis muestra un rendimiento general similar al de los pronósticos inicializados a partir del sistema GFS, e incluso un impacto positivo en algunos casos. Actualmente el SMN está probando un sistema de asimilación similar al implementado en Dillon et al. (2021) para utilizarlo en la generación de pronósticos de manera operativa.

0.5 Motivación y objetivos

En base a los importantes avances en la asimilación de datos en general y en las aplicaciones regionales en Argentina y Sudamérica, el objetivo principal de este trabajo es contribuir a la cuantificación y comparación del impacto de las estaciones meteorológicas de superficie de alta resolución, las observaciones de viento derivadas de satélite y las radiancias satelitales en cielo claro, en un sistema de DA de mesoescala, frecuentemente actualizado y basado en ensambles. En particular, este trabajo se centrará en el potencial impacto de la asimilación en el contexto de los eventos de sistemas convectivos de mesoescala (SCM) debido a la importancia que cobran este tipo de eventos en la región.

En particular, este trabajo busca investigar el impacto de distintas fuentes de datos en una región donde la red de observación convencional es bastante escasa y donde las contribuciones potenciales de sistemas de observación como redes de estaciones automáticas y observaciones de satélite son mayores. Para alcanzar este objetivo, se realizaron distintos experimentos de asimilación de datos aplicados a un estudio de caso de un SCM que se desarrolló sobre el sur de Sudamérica durante el 22 y 23 de noviembre de 2018 durante el período de observación intensa de la campaña de campo RELAMPAGO.

Chapter 1

Metodología

1.1 El sistema de asimilación GSI

GSI y CRTM

1.2 Caso de estudio

El 22 de noviembre de 2018 un frente frío cruzó la región centro de Argentina generando el desarrollo de celdas convectivas aisladas que crecieron rápidamente hasta convertirse en un SCM excepcionalmente grande. Al norte de la región, un frente cálido contribuyó al desarrollo de sistemas multicelulares que finalmente crecieron y se fusionaron con el SCM. El SCM recorrió aproximadamente 2500 km de sur a norte, disipándose sobre Paraguay y el sur de Brasil al cabo de 42 horas.

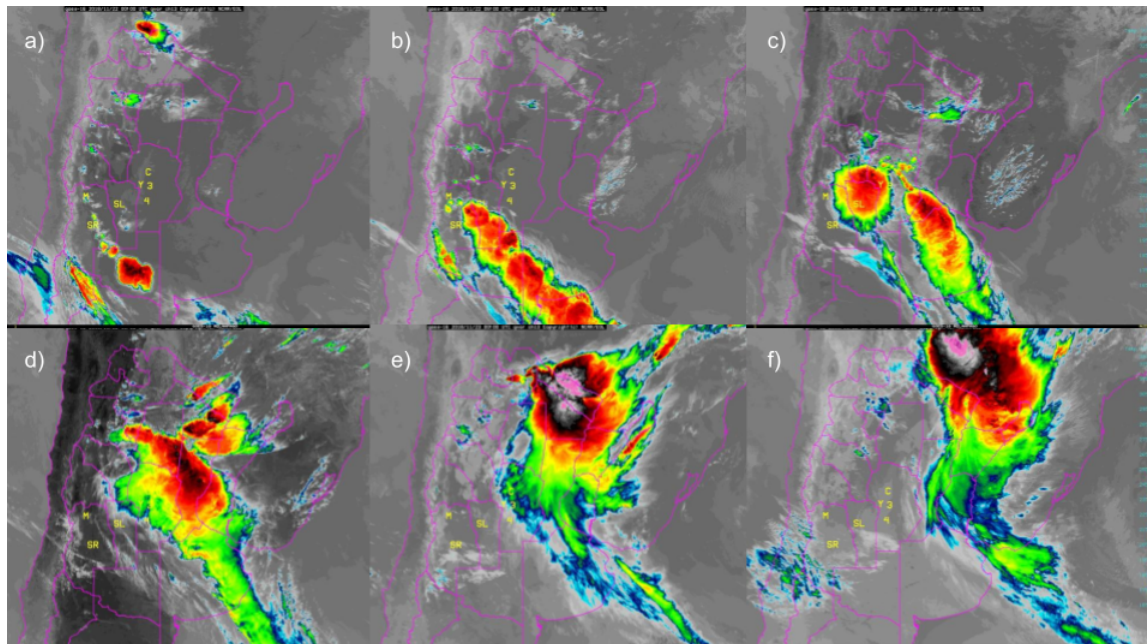


Figure 1.1: Serie de imágenes del canal 13 (10.3 μ m) del satélite GOES-16 para las a) 00 UTC, b) 06 UTC, c) 12 UTC, d) 18 UTC del 22 de noviembre de 2018 y e) 00 UTC y f) 06 UTC del 23 de noviembre de 2018.

1.3 Configuración del ensamble

Las simulaciones numéricas para el caso de estudio se realizan utilizando la versión 3.9.1 de modelo WRF (Skamarock et al. (2008)). Se utilizó una resolución horizontal de 10 km (150 x 200 puntos de retícula) y 37 niveles en la vertical con el tope del modelo en 50 hPa. Las condiciones iniciales y de contorno surgen del análisis del Global Forecast System (GFS) (resolución horizontal de 0.25^{circ} y resolución temporal de 6 horas; (???)). El dominio cubre la zona indicada en la Figura ??fig:dominio) para capturar el desarrollo del SCM durante el periodo simulado.

Los análisis se generaron utilizando la implementación LETKF (V1.3, Hunt et al. (2007)) que forma parte del sistema de análisis Gridpoint Statistical Interpolation (GSI V3.8; Shao et al. (2016)). Se utilizó un enfoque de actualización rápida con análisis horario y una ventana de asimilación centrada, lo que significa que se asimilaron todas las observaciones dentro de ± 30 minutos del tiempo de análisis. Además, aas observaciones se asimilaron usando un enfoque 4D, es decir, comparándolas con el first guess más cercano que se genera en intervalos de 10 minutos. Para las observaciones de satélite, se utilizó el Community Radiative Transfer Model versión 2.3 (CRTM;

Han et al. (2006)) como operador de observaciones para calcular las temperaturas de brillo simuladas por el modelo.

Utilizamos un conjunto de 60 miembros, cuya media al principio del ciclo de AD se inicializa utilizando el análisis determinístico del GFS al que se le suman perturbaciones aleatorias para generar el ensamble inicial. Las perturbaciones se generaron como diferencias escaladas entre dos estados atmosféricos aleatorios obtenidos a partir de los datos del Reanálisis del Sistema de Predicción del Clima (CFSR) con una resolución horizontal de $0,5^{circ}$ que tiene una con una evolución temporal suave (Necker et al., 2020; Maldonado et al., 2021). De este modo, preservamos el equilibrio casi hidrostático y geostrófico de las escalas mayores. Este método ayuda a evitar una subestimación del spread del ensamble (Ouaraini et al., 2015). Las perturbaciones también se aplicaron en los límites para mantener niveles adecuados de spread dentro del dominio del ensamble.

Además de las perturbaciones aleatorias en los límites laterales, se utilizó un esquema de multifísicas para representar mejor la incertidumbre en el modelo dentro del sistema de AD. Utilizamos 9 configuraciones diferentes que consisten en la combinación de 3 esquemas de convección húmeda (Kain-Fritsch (Kain, 2004), Grell-Freitas (Grell and Freitas, 2013), y Betts-Miller-Janjic (Janjić, 1994)) y 3 esquemas de capa límite planetaria (Esquema de la Universidad de Yonsei (Hong, Noh, et al., 2006), Esquema Mellor-Yamada-Janjic (Janjić, 1994), y Mellor-Yamada Nakanishi Niino (Nakanishi and Niino, 2009)). Todos los miembros del conjunto utilizan las mismas parametrizaciones del modelo de superficie terrestre (Noah-MP, Chen and Dudhia (2001)), de microfísica (esquema de un solo momento de 6 clases del WRF (Hong, Kim, et al., 2006)) y de procesos radiativos (esquema de onda corta y onda larga del RRTMG (Iacono et al., 2008)).

Para reducir el efecto de las correlaciones espurias en la estimación de las covarianzas de los errores de las observaciones, utilizamos un radio de localización horizontal de 180 km y un radio de localización vertical de 0,4 (en coordenadas de presión logarítmica) como en Dillon et al. (2021) para todos los tipos de observaciones. Se aplicó con un parámetro de inflación $\alpha = 0,9$ para mitigar el impacto de los errores de muestreo y para considerar los errores del modelo que no se tienen en cuenta en el enfoque multifísica del ensamble (Whitaker and Hamill, 2012).

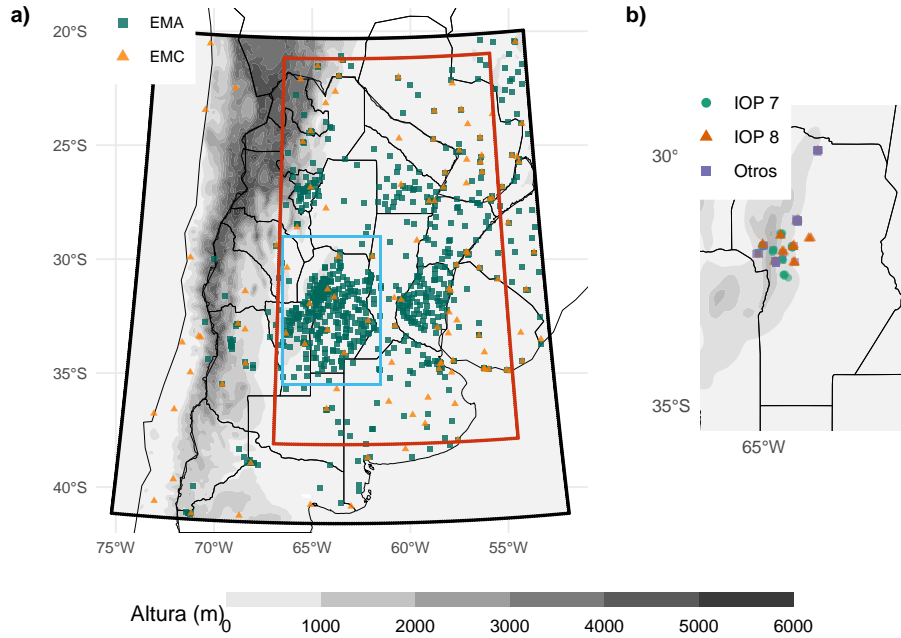


Figure 1.2: a) Dominio utilizado para las simulaciones (recuadro negro), dominio interior utilizado para la comparación entre experimentos (recuadro rojo), la región mostrada en b) (recuadro azul claro), y la ubicación de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA, cuadrados verdes) y las Estaciones Meteorológicas Convencionales (EMC, triángulos naranjas). b) Ubicación de los lanzamientos de radiosondeos durante RELAMPAGO. Los puntos verdes corresponden a los radiosondeos lanzados durante el IOP 7, los triángulos naranjas son radiosondeos lanzados durante el IOP 8, y los cuadrados morados son radiosondeos lanzados fuera de los periodos de medición intensiva. También se muestra la topografía en metros (sombreada).

1.4 Verificación: obs y metricas

1.4.1 Conjunto de datos de validación

Para evaluar el desempeño del sistema AD presentado en esta tesis, utilizamos los siguientes conjuntos de observaciones:

- **Multi-Network Composite Highest Resolution Radiosonde Data (Earth Observing Laboratory, 2020):** radiosondeos en alta resolución lanzados desde varias ubicaciones durante el periodo de la campaña de campo de RELAMPAGO en junto con las radiosondeos operativos del SMN. Sólo se utilizaron para la validación los sondeos que no ingresaron en el sistema de asimilación. El periodo del experimento abarca las misiones IOP 7 y 8, durante

las cuales se lanzaron 74 radiosondos en una pequeña zona cercana al centro del dominio experimental (Figura ??fig:dominio)b).

- **IMERG Final Run (Huffman et al., 2018):** estimación de la precipitación a partir de datos de la constelación de satélites GPM (por su nombre en inglés Global Precipitation Measurement) con una resolución espacial de $0,01^{circ}$ y una resolución temporal de 30 minutos para validar la habilidad de los pronósticos de 1 hora para representar la precipitación sobre el dominio.
- **Datos del Sistema Nacional de Radares Meteorológicos (SINARAME):** Se utilizaron observaciones de radar para realizar una evaluación cualitativa y visual de las características convectivas. Los datos provienen de 9 radares ubicados en el dominio y son provistos por la red de radares Doppler de doble polarización en banda C (de Elía et al., 2017) con una frecuencia temporal de 10 minutos. Para este trabajo se utilizó únicamente la máxima reflectividad de la columna (COLMAX) más cercana al momento de análisis.

1.4.2 Métodos de verificación

Se seleccionaron un conjunto de métricas para evaluar diferentes aspectos del análisis obtenido para cada experimento y los pronósticos inicializados a partir de ellos. Estas métricas incluyen una validación de cómo se cuantifica la incertidumbre en el first guess y en el análisis, y cómo los diferentes experimentos se ajustan a un conjunto independiente de observaciones que no se asimilan.

Para evaluar la consistencia de la estimación de la incertidumbre en el first guess y en el análisis utilizamos la Reduced Centered Random Variable o RCRV (Candille et al. (2007)) que se define como:

$$RCRV = \frac{x_o - m}{\sqrt{\sigma_o^2 + \sigma^2}} \quad (1.1)$$

donde x_o es la observación asimilada y su error σ_o , m la media ensamble del análisis en el espacio de las observaciones, y la desviación estándar σ del ensamble. La media de $RCRV$ calculada sobre todas las realizaciones representa el sesgo de la media del conjunto con respecto a las observaciones normalizadas por la incertidumbre estimada:

$$meanRCRV = E[RCRV] \quad (1.2)$$

La desviación estándar de la $RCRV$ o $sdRCRV$ mide la concordancia de la dispersión

del ensamble y el error de observación con respecto a la distancia entre la media del ensamble y las observaciones, y por lo tanto, la sobre o infradispersión sistemática del ensamble:

$$sdRCRV = \sqrt{\frac{M}{M-1} E[(RCRV - meanRCRV)^2]} \quad (1.3)$$

donde M es el tamaño del ensamble. Un sistema consistente no tendrá ningún bias ($meanRCRV = 0$) y la desviación estándar será igual a 1 ($sdRCRV = 1$). Si el ensamble tiene un bias positivo, $meanRCRV$ serán positivo, por el contrario, si el ensamble tiene un bias negativo, $meanRCRV$ será negativo. Un $sdRCRV > 1$ indica que la dispersión del ensamble es baja $sdRCRV < 1$ indica que la dispersión del ensamble es alta.

Para analizar el ajuste del first guess y el análisis a un conjunto de observaciones independientes, los radiosondeos de alta resolución de RELAMPAGO, se calculó la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el BIAS:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - O_i)^2} \quad (1.4)$$

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - O_i) \quad (1.5)$$

donde O y X representan las observaciones independientes y las simuladas respectivamente, y N es el tamaño de la muestra.

Para comparar la pricipitación pronósticada a 1 hora con las estimaciones de precipitación de IMERG, calculamos el Fractions Skill Score (FSS, Roberts (2008)) para diferentes radios de influencia y umbrales de precipitación:

$$FSS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_{xi} - P_{oi})^2}{\sum_{i=1}^N (P_{xi})^2 + \sum_{i=1}^N (P_{oi})^2} \quad (1.6)$$

donde P_{oi} es la proporción de puntos de retícula en el subdominio $i - th$ donde la que la precipitación acumulada observada es mayor que un umbral especificado. Siguiendo a Roberts et al. (2020), P_{xi} se calcula sobre el ensamble completo y cuantifica de la probabilidad de que la precipitación sea mayor al mismo umbral en cada punto de cuadrícula, y luego promediando sobre el subdominio $i - th$. El FSS se calculó a partir de la precipitación acumulada en ventanas moviles de 6 horas sumando los pronósticos de precipitación acumulada de 1 hora.

1.5 Recursos computacionales

Todos los experimentos corrieron en la supercomputadora Cheyenne del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) (Computational and Information Systems Laboratory, 2019). El posprocesamiento y análisis se realizó en [CIMA]. El análisis de datos se generó utilizando el lenguaje de programación R (???), utilizando los paquetes `data.table` (???) y `metR` (???), entre otros. Todos los gráficos se han realizado con `ggplot2` (???) y la versión final de la tesis se generó con `knitr`, `rmarkdown` (???; ???) y `tesisdown` [?].

Chapter 2

Asimilacion de observaciones de estaciones meteorológicas automáticas, vientos derivados de satélite y radianzas de satelites polares

2.1 Presentación y metodología

2.1.1 Observaciones asimiladas

2.1.2 Configuracion de los experimentos

2.2 Resultados

2.2.1 Ensamble

2.2.2 Impacto en el analisis

2.2.3 Verificacion

2.2.4 Conclusiones

Chapter 3

Graphics, References, and Labels

3.1 Figures

If your thesis has a lot of figures, *R Markdown* might behave better for you than that other word processor. One perk is that it will automatically number the figures accordingly in each chapter. You'll also be able to create a label for each figure, add a caption, and then reference the figure in a way similar to what we saw with tables earlier. If you label your figures, you can move the figures around and *R Markdown* will automatically adjust the numbering for you. No need for you to remember! So that you don't have to get too far into LaTeX to do this, a couple **R** functions have been created for you to assist. You'll see their use below.

In the **R** chunk below, we will load in a picture stored as `reed.jpg` in our main directory. We then give it the caption of "Reed logo", the label of "reedlogo", and specify that this is a figure. Make note of the different **R** chunk options that are given in the R Markdown file (not shown in the knitted document).



Figure 3.1: Reed logo

Here is a reference to the Reed logo: Figure 3.1. Note the use of the `fig:` code here. By naming the **R** chunk that contains the figure, we can then reference that figure later as done in the first sentence here. We can also specify the caption for the

figure via the R chunk option `fig.cap`.

Below we will investigate how to save the output of an **R** plot and label it in a way similar to that done above. Recall the `flights` dataset from Chapter ?? (Note that we've shown a different way to reference a section or chapter here.) We will next explore a bar graph with the mean flight departure delays by airline from Portland for 2014.

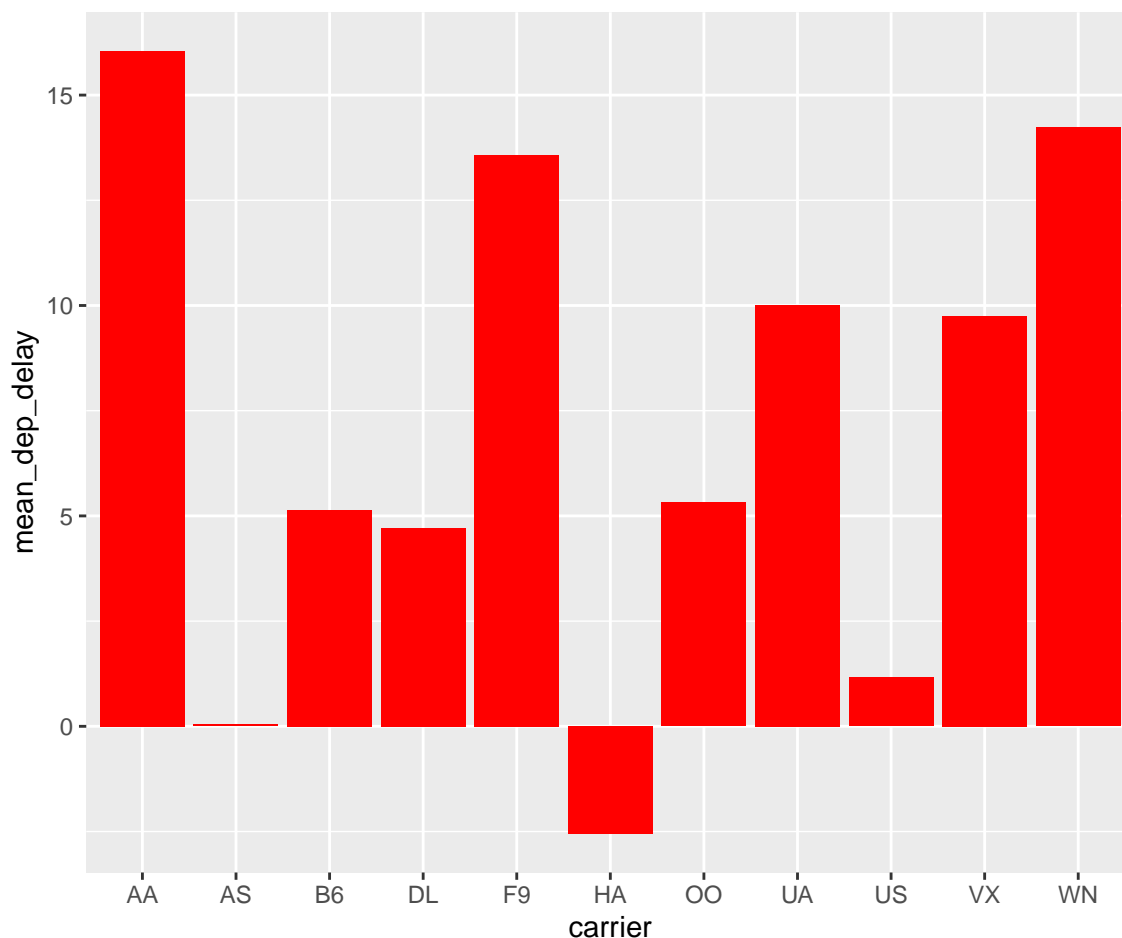


Figure 3.2: Mean Delays by Airline

Here is a reference to this image: Figure 3.2.

A table linking these carrier codes to airline names is available at <https://github.com/ismayc/pnwflights14/blob/master/data/airlines.csv>.

Next, we will explore the use of the `out.extra` chunk option, which can be used to shrink or expand an image loaded from a file by specifying `"scale= "`. Here we use the mathematical graph stored in the “subdivision.pdf” file.

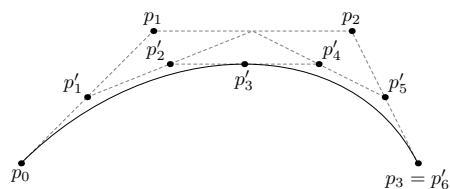


Figure 3.3: Subdiv. graph

Here is a reference to this image: Figure 3.3. Note that `echo=FALSE` is specified so that the **R** code is hidden in the document.

More Figure Stuff

Lastly, we will explore how to rotate and enlarge figures using the `out.extra` chunk option. (Currently this only works in the PDF version of the book.)

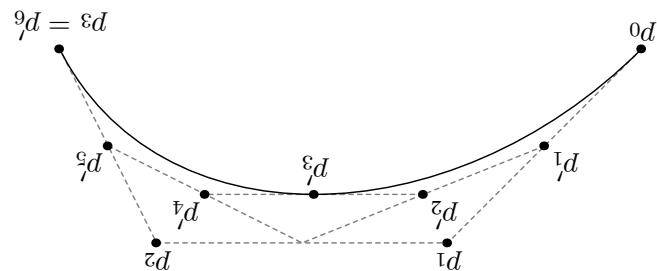


Figure 3.4: A Larger Figure, Flipped Upside Down

As another example, here is a reference: Figure 3.4.

3.2 Footnotes and Endnotes

You might want to footnote something.¹ The footnote will be in a smaller font and placed appropriately. Endnotes work in much the same way. More information can be found about both on the CUS site or feel free to reach out to `data@reed.edu`.

3.3 Bibliographies

Of course you will need to cite things, and you will probably accumulate an armful of sources. There are a variety of tools available for creating a bibliography database

¹footnote text

(stored with the .bib extension). In addition to BibTeX suggested below, you may want to consider using the free and easy-to-use tool called Zotero. The Reed librarians have created Zotero documentation at <https://libguides.reed.edu/citation/zotero>. In addition, a tutorial is available from Middlebury College at <https://sites.middlebury.edu/zoteromiddlebury/>.

R Markdown uses *pandoc* (<https://pandoc.org/>) to build its bibliographies. One nice caveat of this is that you won't have to do a second compile to load in references as standard LaTeX requires. To cite references in your thesis (after creating your bibliography database), place the reference name inside square brackets and precede it by the "at" symbol. For example, here's a reference to a book about worrying: (???). This Molina1994 entry appears in a file called `thesis.bib` in the `bib` folder. This bibliography database file was created by a program called BibTeX. You can call this file something else if you like (look at the YAML header in the main .Rmd file) and, by default, is to placed in the `bib` folder.

For more information about BibTeX and bibliographies, see our CUS site (<https://web.reed.edu/cis/help/latex/index.html>)². There are three pages on this topic: *bibtex* (which talks about using BibTeX, at <https://web.reed.edu/cis/help/latex/bibtex.html>), *bibtexstyles* (about how to find and use the bibliography style that best suits your needs, at <https://web.reed.edu/cis/help/latex/bibtexstyles.html>) and *bibman* (which covers how to make and maintain a bibliography by hand, without BibTeX, at <https://web.reed.edu/cis/help/latex/bibman.html>). The last page will not be useful unless you have only a few sources.

If you look at the YAML header at the top of the main .Rmd file you can see that we can specify the style of the bibliography by referencing the appropriate csl file. You can download a variety of different style files at <https://www.zotero.org/styles>. Make sure to download the file into the csl folder.

Tips for Bibliographies

- Like with thesis formatting, the sooner you start compiling your bibliography for something as large as thesis, the better. Typing in source after source is mind-numbing enough; do you really want to do it for hours on end in late April? Think of it as procrastination.
- The cite key (a citation's label) needs to be unique from the other entries.

²(???)

- When you have more than one author or editor, you need to separate each author’s name by the word “and” e.g. `Author = {Noble, Sam and Youngberg, Jessica},.`
- Bibliographies made using BibTeX (whether manually or using a manager) accept LaTeX markup, so you can italicize and add symbols as necessary.
- To force capitalization in an article title or where all lowercase is generally used, bracket the capital letter in curly braces.
- You can add a Reed Thesis citation³ option. The best way to do this is to use the `phdthesis` type of citation, and use the optional “type” field to enter “Reed thesis” or “Undergraduate thesis.”

3.4 Anything else?

If you’d like to see examples of other things in this template, please contact the Data @ Reed team (email data@reed.edu) with your suggestions. We love to see people using *R Markdown* for their theses, and are happy to help.

³(???)

Conclusion

If we don't want Conclusion to have a chapter number next to it, we can add the `{-}` attribute.

More info

And here's some other random info: the first paragraph after a chapter title or section head *shouldn't be* indented, because indents are to tell the reader that you're starting a new paragraph. Since that's obvious after a chapter or section title, proper typesetting doesn't add an indent there.

Appendix A

The First Appendix

This first appendix includes all of the R chunks of code that were hidden throughout the document (using the `include = FALSE` chunk tag) to help with readability and/or setup.

In the main Rmd file

```
# This chunk ensures that the thesishdown package is  
# installed and loaded. This thesishdown package includes  
# the template files for the thesis.  
if (!require(remotes)) {  
  if (params$`Install needed packages for {thesishdown}`) {  
    install.packages("remotes", repos = "https://cran.rstudio.com")  
  } else {  
    stop(  
      paste('You need to run install.packages("remotes")',  
            "first in the Console.")  
    )  
  }  
}  
  
if (!require(thesishdown)) {  
  if (params$`Install needed packages for {thesishdown}`) {  
    remotes::install_github("ismayc/thesishdown")  
  } else {  
    stop(  
      paste(  
        "You need to run",
```

```
      'remotes::install_github("ismayc/thesisdown")',  
      "first in the Console."  
    )  
  )  
}  
}  
library(thesisdown)  
# Set how wide the R output will go  
options(width = 70)
```

In Chapter 3:

```
# This chunk ensures that the thesisdown package is  
# installed and loaded. This thesisdown package includes  
# the template files for the thesis and also two functions  
# used for labeling and referencing  
if (!require(remotes)) {  
  if (params$`Install needed packages for {thesisdown}`) {  
    install.packages("remotes", repos = "https://cran.rstudio.com")  
  } else {  
    stop(  
      paste(  
        'You need to run install.packages("remotes")',  
        "first in the Console."  
      )  
    )  
  }  
}  
  
if (!require(dplyr)) {  
  if (params$`Install needed packages for {thesisdown}`) {  
    install.packages("dplyr", repos = "https://cran.rstudio.com")  
  } else {  
    stop(  
      paste(  
        'You need to run install.packages("dplyr")',  
        "first in the Console."  
      )  
    )  
  }  
}
```



```

    )
  )
}
}
if (!require(ggplot2)) {
  if (params$`Install needed packages for {thesisdown}`) {
    install.packages("ggplot2", repos = "https://cran.rstudio.com")
  } else {
    stop(
      paste(
        'You need to run install.packages("ggplot2")',
        "first in the Console."
      )
    )
  }
}
if (!require(bookdown)) {
  if (params$`Install needed packages for {thesisdown}`) {
    install.packages("bookdown", repos = "https://cran.rstudio.com")
  } else {
    stop(
      paste(
        'You need to run install.packages("bookdown")',
        "first in the Console."
      )
    )
  }
}
if (!require(thesisdown)) {
  if (params$`Install needed packages for {thesisdown}`) {
    remotes::install_github("ismayc/thesisdown")
  } else {
    stop(
      paste(
        "You need to run",
        'remotes::install_github("ismayc/thesisdown")',

```

```
      "first in the Console."
    )
  )
}
}
library(thesisdown)
library(dplyr)
library(ggplot2)
library(knitr)
flights <- read.csv("data/flights.csv", stringsAsFactors = FALSE)
```

Appendix B

The Second Appendix, for Fun

References

- Aksoy, A., Dowell, D.C., and Snyder, C., 2010. A Multicase Comparative Assessment of the Ensemble Kalman Filter for Assimilation of Radar Observations. Part II: Short-Range Ensemble Forecasts. *Monthly Weather Review*, 138, 4, 1273–1292.
- Andersson, E., Hollingsworth, A., Kelly, G., Lönnberg, P., Pailleux, J., and Zhang, Z., 1991. Global Observing System Experiments on Operational Statistical Retrievals of Satellite Sounding Data. *Monthly Weather Review*, 119, 8, 1851–1865.
- Bae, J.-H., and Min, K.-H., 2022. Forecast Characteristics of Radar Data Assimilation Based on the Scales of Precipitation Systems. *Remote Sensing*, 14, 3, 3, 605.
- Bao, Y., Xu, J., Powell Jr., A.M., Shao, M., Min, J., and Pan, Y., 2015. Impacts of AMSU-A, MHS and IASI data assimilation on temperature and humidity forecasts with GSI-WRF over the western United States. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8, 10, 4231–4242.
- Bauce Machado, V., gustavo de goncalves, luis, Vendrasco, E., Sinhori, N., Herdies, D., Sapucci, L., Levien, C., Quadro, M., Rodrigues, T., and Cardoso, C. and others, 2017. Investigating the impacts of convective scale hazardous weather events in Santa Catarina State through the CPTEC/INPE local data assimilation system. In. Presented at the Seventh International WMO Symposium on Data Assimilation.
- Candille, G., Côté, C., Houtekamer, P.L., and Pellerin, G., 2007. Verification of an Ensemble Prediction System against Observations. *Monthly Weather Review*, 135, 7, 2688–2699.
- Chang, W., Jacques, D., Fillion, L., and Baek, S.-J., 2017. Assimilation of Hourly Surface Observations with the Canadian High-Resolution Ensemble Kalman Filter. *Atmosphere-Ocean*, 55, 4-5, 247–263.
- Chen, F., and Dudhia, J., 2001. Coupling an Advanced Land Surface–Hydrology Model with the Penn State–NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129, 4, 569–585.
- Chen, X., Zhao, K., Sun, J., Zhou, B., and Lee, W.-C., 2016. Assimilating surface observations in a four-dimensional variational Doppler radar data assimilation system

- to improve the analysis and forecast of a squall line case. *Advances in Atmospheric Sciences*, 33, 10, 1106–1119.
- Cherubini, T., Businger, S., Velden, C., and Ogasawara, R., 2006. The Impact of Satellite-Derived Atmospheric Motion Vectors on Mesoscale Forecasts over Hawaii. *Monthly Weather Review*, 134, 7, 2009–2020.
- Clark, A.J., Gallus, W.A., Xue, M., and Kong, F., 2009. A Comparison of Precipitation Forecast Skill between Small Convection-Allowing and Large Convection-Parameterizing Ensembles. *Weather and Forecasting*, 24, 4, 1121–1140.
- Computational and Information Systems Laboratory, 2019. Cheyenne: HPE/SGI ICE XA System (University Community Computing). National Center for Atmospheric Research Boulder, CO.
- de Elía, R., Vidal, L., and Lohigorry, P., 2017. El SMN y la red argentina de radares meteorológicos (<http://hdl.handle.net/20.500.12160/625>).
- Dillon, M.E., Maldonado, P., Corrales, P., Skabar, Y.G., Ruiz, J., Sacco, M., Cutraro, F., Mingari, L., Matsudo, C., and Vidal, L. and others, 2021. A rapid refresh ensemble based data assimilation and forecast system for the RELAMPAGO field campaign. *Atmospheric Research*, 105858.
- Earth Observing Laboratory, U. -, 2020. Multi-network composite highest resolution radiosonde data. Version 1.3. UCAR/NCAR - earth observing laboratory.
- Eyre, J.R., English, S.J., and Forsythe, M., 2020. Assimilation of satellite data in numerical weather prediction. Part I: The early years. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 726, 49–68.
- Eyre, J.R., Bell, W., Cotton, J., English, S.J., Forsythe, M., Healy, S.B., and Pavein, E.G., 2022. Assimilation of satellite data in numerical weather prediction. Part II: Recent years. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148, 743, 521–556.
- Ferreira, R.C., Herdies, D.L., Vendrasco, É.P., Beneti, C.A.A., and Biscaro, T.S., 2017. Impacto da Assimilação de Dados de Radar em Sistemas Convectivos de Mesoescala: Um Estudo de Caso. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32, 3, 447–458.
- Ferreira, R.C., Alves Júnior, M.P., Vendrasco, éder P., Aravéquia, J.A., Nolasco Junior, L.R., Biscaro, T.S., Ferreira, R.C., Alves Júnior, M.P., Vendrasco, éder P., and Aravéquia, J.A. and others, 2020. The Impact of Microphysics Parameterization on Precipitation Forecast Using Radar Data Assimilation. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35, 1, 123–134.
- Gao, F., Huang, X.-Y., Jacobs, N.A., and Wang, H., 2015. Assimilation of wind speed and direction observations: Results from real observation experiments. *Tellus A*:

- Dynamic Meteorology and Oceanography, 67, 1, 27132.
- García Skabar, Y., 1997. Análisis objetivo regional para inicializar un modelo de diez niveles en forma operativa. Tesis de licenciatura en ciencias de la atmósfera.
- Gasperoni, N.A., Wang, X., Brewster, K.A., and Carr, F.H., 2018. Assessing Impacts of the High-Frequency Assimilation of Surface Observations for the Forecast of Convection Initiation on 3 April 2014 within the Dallas–Fort Worth Test Bed. *Monthly Weather Review*, 146, 11, 3845–3872.
- Goncalves de Goncalves, L.G., Sapucci, L., Vendrasco, E., de Mattos, J.G., Ferreira, C., Khamis, E., and Cruz, N., 2015. A rapid update data assimilation cycle over South America using 3DVar and EnKF. In *The 20th International TOVS Study Conference (ITSC-20)*.
- Grell, G.A., and Freitas, S.R., 2013. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 13, 9, 23845–23893.
- Ha, S.-Y., and Snyder, C., 2014. Influence of Surface Observations in Mesoscale Data Assimilation Using an Ensemble Kalman Filter. *Monthly Weather Review*, 142, 4, 1489–1508.
- Han, Y., Van Delst, P., Liu, Q., Weng, F., Yan, B., Treadon, R., and Derber, J., 2006. JCSDA Community Radiative Transfer Model (CRTM)—version 1 p. 40.
- Hong, S.-Y., Noh, Y., and Dudhia, J., 2006. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly Weather Review*, 134, 9, 2318–2341.
- Hong, S.-Y., Kim, J.-H., Lim, J.-o., and Dudhia, J., 2006. The WRF Single Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society*, 42, 129–151.
- Huffman, G., Bolvin, D., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Kidd, C., Nelkin, E., Sorooshian, S., Tan, J., and Xie, P., 2018. NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG), National Aeronautics and Space Administration (NASA), p. 35.
- Hunt, B.R., Kostelich, E.J., and Szunyogh, I., 2007. Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 230, 1-2, 112–126.
- Iacono, M.J., Delamere, J.S., Mlawer, E.J., Shephard, M.W., Clough, S.A., and Collins, W.D., 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research*, 113, D13, D13103.
- Janjić, Z.I., 1994. The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of

- the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. *Monthly Weather Review*, 122, 5, 927–945.
- Kain, J.S., 2004. The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. *JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY*, 43, 12.
- Kalnay, E., 2002, November 6. Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability (<https://www.cambridge.org/highereducation/books/atmospheric-modeling-data-assimilation-and-predictability/C5FD207439132836E85027754CE9BC1A>).
- Kelly, G.a.M., Mills, G.A., and Smith, W.L., 1978. Impact of Nimbus-6 Temperature Soundings on Australian Region Forecasts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 59, 4, 393–406.
- Maejima, Y., Miyoshi, T., Kunii, M., Seko, H., and Sato, K., 2019. Impact of Dense and Frequent Surface Observations on 1-Minute-Update Severe Rainstorm Prediction: A Simulation Study. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 97, 1, 253–273.
- Maldonado, P., Ruiz, J., and Saulo, C., 2021. Sensitivity to Initial and Boundary Perturbations in Convective-Scale Ensemble-Based Data Assimilation: Imperfect-Model OSSEs. *SOLA*, 17, 0, 96–102.
- Nakanishi, M., and Niino, H., 2009. Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 87, 5, 895–912.
- Necker, T., Geiss, S., Weissmann, M., Ruiz, J., Miyoshi, T., and Lien, G., 2020. A convective-scale 1,000-member ensemble simulation and potential applications. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 728, 1423–1442.
- Nesbitt, S.W., Salio, P.V., Ávila, E., Bitzer, P., Carey, L., Chandrasekar, V., Deierling, W., Dominguez, F., Dillon, M.E., and Garcia, C.M. and others, 2021. A storm safari in Subtropical South America: Proyecto RELAMPAGO. *Bulletin of the American Meteorological Society*, -1, aop, 1–64.
- Ohring, G., 1979. Impact of Satellite Temperature Sounding Data on Weather Forecasts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 60, 10, 1142–1147.
- Ouaraini, R.E., Berre, L., Fischer, C., and Sayouty, E.H., 2015. Sensitivity of regional ensemble data assimilation spread to perturbations of lateral boundary conditions. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 67, 1, 28502.
- Roberts, B., Gallo, B.T., Jirak, I.L., Clark, A.J., Dowell, D.C., Wang, X., and Wang, Y., 2020. What Does a Convection-Allowing Ensemble of Opportunity Buy Us in Forecasting Thunderstorms? *Weather and Forecasting*, 35, 6, 2293–2316.
- Roberts, N., 2008. Assessing the spatial and temporal variation in the skill of precipitation

- forecasts from an NWP model. *Meteorological Applications*, 15, 1, 163–169.
- Sawada, M., Ma, Z., Mehra, A., Tallapragada, V., Oyama, R., and Shimoji, K., 2019. Impacts of Assimilating High-Resolution Atmospheric Motion Vectors Derived from Himawari-8 on Tropical Cyclone Forecast in HWRF. *Monthly Weather Review*, 147, 10, 3721–3740.
- Shao, H., Derber, J., Huang, X.-Y., Hu, M., Newman, K., Stark, D., Lueken, M., Zhou, C., Nance, L., and Kuo, Y.-H. and others, 2016. Bridging Research to Operations Transitions: Status and Plans of Community GSI. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97, 8, 1427–1440.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., and Powers, J.G., 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 p. 125.
- Sobash, R.A., and Stensrud, D.J., 2015. Assimilating Surface Mesonet Observations with the EnKF to Improve Ensemble Forecasts of Convection Initiation on 29 May 2012. *Monthly Weather Review*, 143, 9, 3700–3725.
- Stensrud, D.J., Wicker, L.J., Xue, M., Dawson, D.T., Yussouf, N., Wheatley, D.M., Thompson, T.E., Snook, N.A., Smith, T.M., and Schenkman, A.D. and others, 2013. Progress and challenges with Warn-on-Forecast. *Atmospheric Research*, 123, 2–16.
- Toshio Inouye, R., Calvetti, L., Gonçalves, J., Maske, B., Neundorf, R., Beneti, C., Diniz, F., Vendrasco, E., Herdies, D., and gustavo de gonalves, luis, 2017. Impact of radar data assimilation on a severe storm study in brazil. In. Presented at the 97th American Meteorological Meeting Annual Meeting.
- Vendrasco, E.P., Machado, L.A.T., Araujo, C.S., Ribaud, J.-F., and Ferreira, R.C., 2020. Potential use of the GLM for nowcasting and data assimilation. *Atmospheric Research*, 242, 105019.
- Vera, C.S., 1992. Un sistema de asimilación de datos para la región extratropical de Sudamérica.
- Wang, Z.Q., and Randriamampianina, R., 2021. The Impact of Assimilating Satellite Radiance Observations in the Copernicus European Regional Reanalysis (CERRA). *Remote Sensing*, 13, 3, 3, 426.
- Wheatley, D.M., and Stensrud, D.J., 2010. The Impact of Assimilating Surface Pressure Observations on Severe Weather Events in a WRF Mesoscale Ensemble System. *Monthly Weather Review*, 138, 5, 1673–1694.
- Whitaker, J.S., and Hamill, T.M., 2012. Evaluating Methods to Account for System Errors in Ensemble Data Assimilation. *Monthly Weather Review*, 140, 9, 3078–3089.
- Whitaker, J.S., Hamill, T.M., Wei, X., Song, Y., and Toth, Z., 2008. Ensemble Data

- Assimilation with the NCEP Global Forecast System. *Monthly Weather Review*, 136, 2, 463–482.
- Wu, T.-C., Liu, H., Majumdar, S.J., Velden, C.S., and Anderson, J.L., 2014. Influence of Assimilating Satellite-Derived Atmospheric Motion Vector Observations on Numerical Analyses and Forecasts of Tropical Cyclone Track and Intensity. *Monthly Weather Review*, 142, 1, 49–71.
- Zhu, K., Xue, M., Pan, Y., Hu, M., Benjamin, S.G., Weygandt, S.S., and Lin, H., 2019. The Impact of Satellite Radiance Data Assimilation within a Frequently Updated Regional Forecast System Using a GSI-based Ensemble Kalman Filter. *Advances in Atmospheric Sciences*, 36, 12, 1308–1326.