

CAUSAS METEOROLÓGICAS DE LOS ALUDES OCURRIDOS EN LA SERRA DO MAR (BRASIL) EN JULIO DEL 2004

Marcelo E. Seluchi y Sin C. Chou

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)
Cachoeira Paulista, SP, Brasil

RESUMEN

El sistema costero de la Serra do Mar, en Brasil, resulta muy vulnerable a aludes y desastres naturales debido a sus escarpadas laderas, lluvias frecuentes y presencia de ciudades importantes. El presente trabajo aborda un caso particular ocurrido durante la estación seca, donde se produjeron avalanchas en varios puntos de la costa de San Pablo que causaron la destrucción de viviendas y la muerte de personas. El objetivo del trabajo es analizar el origen de las precipitaciones e investigar la influencia de la Serra do Mar en la intensificación de las lluvias. Las precipitaciones fueron básicamente estratiformes y estuvieron asociadas al pasaje de un frente frío relativamente intenso, que se tornó gradualmente estacionario y persistió durante 6 días en la región. El anticiclón post-frontal, inicialmente frío, adquirió paulatinamente características barotrópicas, contribuyendo a la persistencia de la circulación marítima, que fue ascendida por la Serra do Mar. El pasaje de una vaguada de onda corta en los niveles altos no fue la causa principal de las lluvias, pero contribuyó a aumentar la inestabilidad termodinámica y, por lo tanto, a incrementar la intensidad de las precipitaciones creando, de esta forma, condiciones favorables para la ocurrencia de aludes.

Palabras clave: avalanchas, Serra do Mar, simulación numérica

METEOROLOGICAL CAUSES OF THE LANDSLIDES EVENTS AT SERRA DO MAR (BRAZIL) IN JULY 2004.

ABSTRACT

Due to the frequent heavy rainfall and steep slopes, Serra do Mar is a mountain region vulnerable to hazards such as landslides. These mountains are located in Southeast of Brazil and lie along the coastal region. Major cities, industries, roads and pipelines are established in the Serra do Mar. In the present work, a landslide case which occurred during winter, the dry season, is investigated. The objective of this work is to investigate the causes of the heavy rainfall and evaluate the role of the orography in the intensification of precipitation. Rain was mainly from stratiform type of clouds associated with a relatively intense cold front which persisted for about 6 days. This weather system became stationary on the coast of the State of Sao Paulo. The post-frontal anticyclone, which was initially cold, acquired barotropic characteristics. The large scale circulation determined the persistency of southerly and southeasterly winds near the surface. After entering the continent, these winds were lifted by the Serra do Mar mountain chain. The progression of a shortwave trough at upper levels was not the major cause of heavy precipitation, but contributed to enhance the thermodynamic instability and increase the amounts on the days of heaviest precipitation, which caused subsequent landslides in the Serra do Mar.

Keywords: Landslides, Serra do Mar, numerical simulations

Dirección electrónica: marcelo.seluchi@cptec.inpe.br, chou.sinchan@cptec.inpe.br

1 INTRODUCCIÓN

La “Serra do Mar” es un importante sistema montañoso paralelo a la costa brasileña, que alcanza alturas superiores a los 1000m. Su presencia, y la existencia de ciudades e industrias, tornan a la región costera muy vulnerable a las inundaciones y avalanchas, especialmente durante la estación lluviosa. Sin embargo, estos episodios no se restringen a la estación estival, como en el caso aquí investigado. Las situaciones que causan aludes en invierno fueron muy poco analizadas debido a su baja frecuencia, lo que las torna un desafío para los pronosticadores y modelos numéricos.

El objetivo de este trabajo es analizar los procesos físicos asociados a las fuertes lluvias ocurridas durante los días 19 y 20 de julio de 2004, que provocaron la muerte de varias personas en la costa del Estado de San Pablo. El episodio representa la peor catástrofe natural en los últimos 15 años en la región costera de San Pablo durante el período seco.

2 METODOLOGIA

El análisis de los mecanismos físicos responsables por las intensas lluvias fue elaborado a partir de simulaciones con el modelo regional Eta/CPTEC (40km de resolución horizontal y 38 niveles verticales), utilizando a los reanálisis del NCEP como condiciones de contorno laterales. El papel de la topografía fue investigado a través de experimentos de sensibilidad en los cuales fue eliminada la Serra do Mar. Para más detalles sobre la física del modelo Eta consultar Black (1994).

3 RESULTADOS

3.1 Situación sinóptica

Durante los días 16 a 22 de julio de 2004 fuertes y persistentes lluvias tuvieron lugar a lo largo de la costa brasileña, especialmente en los estados de Paraná y San Pablo. Como consecuencia de eso fueron registrados aludes y avalanchas de barro y piedras en varios puntos de la Serra do Mar, que causaron la destrucción de viviendas y construcciones, así como la pérdida de vidas humanas, especialmente en el municipio de Caraguatatuba.

Las lluvias estuvieron asociadas al pasaje de un frente frío, que el día 16 de julio se encontraba aproximadamente sobre el Estado de Santa Catarina (Figura 1). En general, el sistema presentaba características típicas de invierno, como fuerte baroclinicidad, evidente contraste de humedad y el avance de un intenso anticiclón post-frontal extendido meridionalmente. Sin embargo, a partir del día 17 la vaguada asociada al frente en la tropósfera media comenzó a tornarse paulatinamente estacionaria sobre la costa de San Pablo y, simultáneamente, el anticiclón post-frontal se curvó ciclónicamente sobre la región sur de Brasil y el océano Atlántico (como ya se sugiere en la Fig. 1). De esta forma, si bien el anticiclón logró penetrar hasta el Estado de San Pablo causando lluvias a lo largo de su costa, la convergencia de los vientos ocurrió al sur de la capital paulista, dejando a la Serra do Mar dentro de la masa de aire caliente y húmeda.

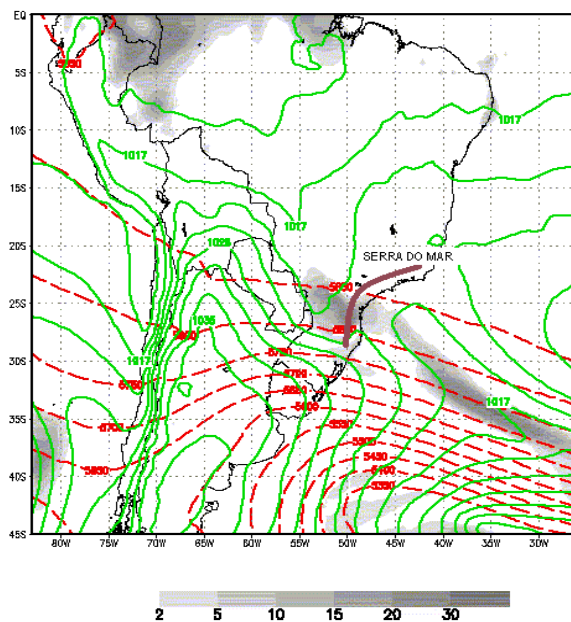


Figura 1: Campo de presión reducida al nmm (líneas verdes, hPa), geopotencial en el nivel de 500 hPa (líneas rojas quebradas) y precipitación acumulada en 24 hs (sombreado) a las 12Z del día 16 de julio de 2004. Campos simulados por el modelo Eta/CPTEC. Se representa esquemáticamente a la Serra do Mar.

La situación sinóptica se tornó más estacionaria y menos baroclínica el día 18 de julio, cuando una vaguada de onda corta se aproximó desde el oeste entre los 20 y 30°S en fase casi opuesta a una

cuña que se desplazó al sur de los 30°S, conformando una situación de bajo índice de circulación zonal. Ese día las lluvias disminuyeron su intensidad pero, aún así, continuaron afectando a la costa paulista.

El frente frío empezó a disiparse el día 19 de julio, mientras que la vaguada que ingresaba desde el oeste, más corta e intensa que en la víspera, provocó la expansión del área de lluvia y el aumento de su intensidad.

Las precipitaciones sobre la Serra do Mar alcanzaron su máxima intensidad durante el 20 de Julio, cuando se produjeron la mayoría de los aludes, en el momento en que la vaguada de altura pasó por la región. En forma simultánea, el anticiclón ubicado sobre el Océano Atlántico adquirió características de bloqueo y su circulación del este asociada permitió la continuidad de las lluvias sobre buena parte de la costa brasileña. Finalmente, a partir del día 23 de julio, las precipitaciones disminuyeron progresivamente debido al lento desplazamiento hacia el este del anticiclón de bloqueo.

En total, alrededor de 200mm se acumularon durante 5 días (el promedio de julio es de alrededor de 50mm), con máximos de 241mm en la ciudad de Santos y de 194 mm en el municipio de Ubatuba, de los cuales 62mm correspondieron al día 20 de julio. En contraste, las lluvias en el interior del continente, a sotavento de la Serra do Mar, mostraron una rápida disminución con valores inferiores a 50mm

3.2 Causas de las lluvias

Las causas de las precipitaciones fueron investigadas a través de simulaciones numéricas realizadas con el modelo Eta/CPTEC, que fueron validadas comparando las lluvias simuladas con las observadas.

El avance de la vaguada de onda corta y el simultáneo aumento de las precipitaciones durante los días 19 y 20 de julio, sugieren que este sistema pudo haber sido el principal causante de los aludes. Con el objetivo de verificar esta hipótesis, la Figura 2 muestra la velocidad vertical omega en el nivel de 700 hPa (contornos) y la diferencia de la divergencia entre los niveles de 300 y 900 hPa (divergencia en 300 hPa menos en 900 hPa, sombreado). En general, el valor de omega en la troposfera media indica un movimiento

ascendente sobre la región de la Serra do Mar y también sobre algunas áreas del este brasileño y del océano adyacente, que coinciden con áreas de diferencia positiva de divergencia (mayor divergencia en 300 que en 900 hPa). Sin embargo, en la estrecha franja costera del litoral paulista y carioca, los movimientos verticales no parecen responder a este último mecanismo dinámico, ya que no se obtienen diferencias positivas en la divergencia neta.

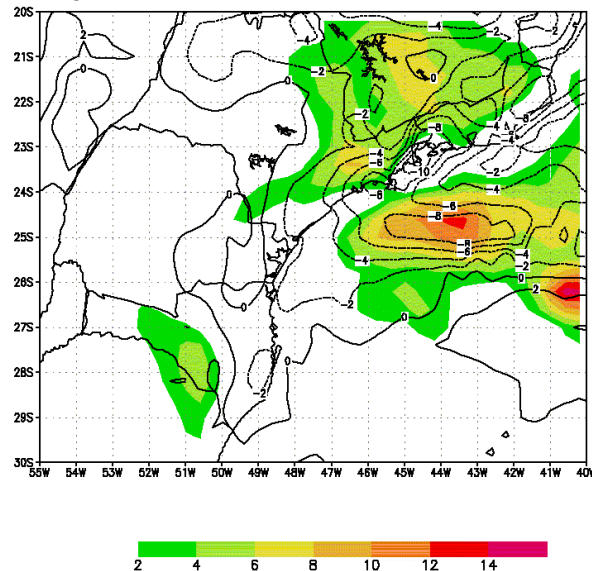


Figura 2: Campo simulado de omega (10^{-3} Pa/s) en 700 hPa (contornos) y divergencia en 300 hPa menos divergencia en 900 hPa (10^{-5} /s sombreado), a las 00Z del día 20 de julio.

Un análisis complementario utilizando el vector Q y la divergencia del vector Q en el nivel de 700 hPa permitió comprobar la ausencia de forzantes dinámicos significativos de escala sinóptica, que puedan explicar el ascenso observado sobre la vertiente costera de la Serra do Mar.

Un estudio más detallado mostró que la lluvia acumulada durante los días 19 y 20 tuvo una relación más estrecha con el campo de omega en 850hPa, en comparación con el de 700hPa (Figura 3), lo que presupone una influencia más directa de la topografía. Esa hipótesis también se sustenta a partir de las simulaciones numéricas, que indican que la precipitación fue básicamente de tipo estratiforme (más del 80%).

Con el objetivo de indagar de qué forma, y en qué medida, la topografía influyó las precipitaciones en la región de la Serra do Mar, fue realizado un experimento de sensibilidad en el

cual fueron removidas totalmente las montañas con altura inferior a 2000m (en el archivo de topografía del modelo). De esta forma, América del Sur fue artificialmente convertida en una llanura, teniendo como único accidente topográfico a la Cordillera de los Andes.

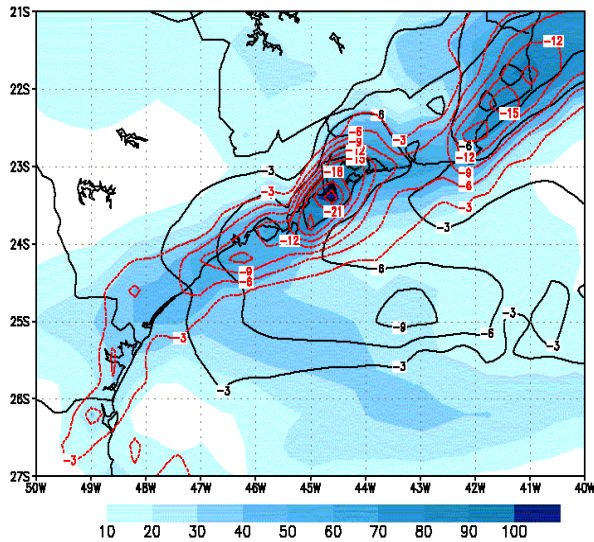


Figura 3: Campo simulado de precipitación acumulada en 24 hs (sombreado, mm) y campos de omega en 700 hPa (10^{-3} Pa/s, líneas negras) y en 850 hPa (10^{-3} Pa/s, líneas rojas)

En primer lugar, la simulación realizada con topografía modificada produjo un pasaje frontal mucho más rápido y la drástica reducción de las precipitaciones. En particular, durante el 20 de julio (día de las lluvias más intensas) hubo una mayor penetración del anticiclón en el continente y un notable avance de los vientos del sur y sudeste en la región central de Brasil, lo que modificó la intensidad y dirección de los vientos costeros como consecuencia de la ausencia de orografía. En este caso las lluvias totalizaron aproximadamente un 20% del valor acumulado en el experimento control, y se distribuyeron más uniformemente entre el litoral y el interior del continente. En consecuencia, es posible afirmar que la presencia de la Serra do Mar, en función de la situación sinóptica dominante, contribuyó a concentrar y aumentar significativamente las lluvias acumuladas en la región del litoral paulista y a extender el período lluvioso, favoreciendo los aludes y avalanchas. Esto puede ser también comprobado a partir de la Figura 4, que presenta la diferencia en la velocidad vertical omega (sombreado) y de la divergencia de masa en el

nivel de 850 hPa (contornos), entre el experimento control y el realizado con topografía modificada.

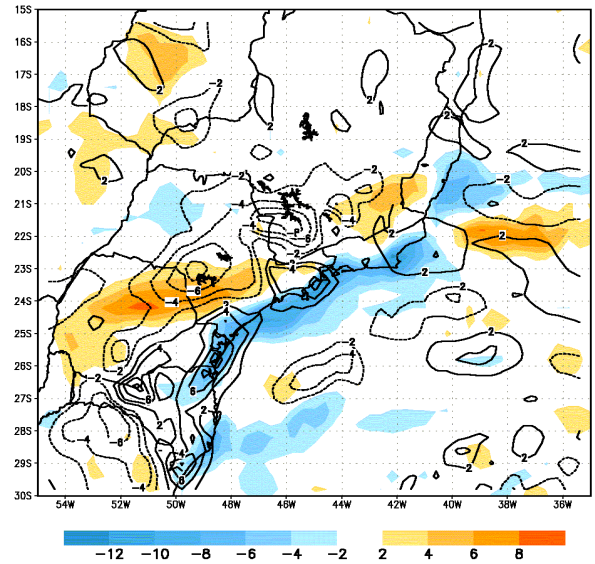


Figura 4: Diferencia entre los campos simulados de omega (10^{-3} Pa/s, sombreado) en 850 hPa y de la divergencia en 900 hPa (10^{-5} /s, contornos) entre el experimento control y el experimento con topografía modificada.

En efecto, la presencia de la cadena montañosa genera ascenso generalizado a lo largo de la costa, desde Santa Catarina hasta Rio de Janeiro y movimientos de subsidencia a sotavento de la sierra, lo que explica el fuerte contraste en los valores de lluvia acumulados a uno y otro lado de la Serra do Mar. Por otro lado, la presencia de la orografía provoca un efecto mecánico en los vientos del sur y sudeste, generando convergencia de masa en la costa y divergencia a sotavento, lo que altera la dirección y velocidad de los vientos, y modificando el desplazamiento del sistema frontal.

4 CONCLUSIONES

Entre los días 16 a 22 de julio de 2004 se produjeron lluvias intensas y persistentes que causaron inundaciones y aludes de barro y piedras en varios puntos de la costa del Estado de San Pablo. Ese tipo de fenómeno ocurre con alguna frecuencia durante la estación lluviosa, pero es mucho más raro en el período seco.

La situación sinóptica estuvo asociada al pasaje de un sistema frontal que fue tornándose

paulatinamente estacionario sobre la costa paulista. El anticiclón post-frontal, inicialmente frío, fue adquiriendo características barotrópicas equivalentes durante el período, generando vientos moderados y persistentes del sudeste sobre la costa de San Pablo. Como consecuencia de esa situación, las lluvias fueron causadas principalmente por el efecto orográfico de la Serra do Mar, que provocó el aumento de la convergencia de masa en los niveles bajos y el ascenso forzado de aire marítimo dentro de una masa cálida y húmeda.

El avance de una perturbación baroclínica de onda corta, si bien no fue la causa fundamental de las lluvias, contribuyó al aumento de la inestabilidad termodinámica (figura no mostrada) y por lo tanto, al incremento de las precipitaciones entre los días 19 y 20 de julio, creando condiciones favorables para la ocurrencia de avalanchas, dada la fuerte pendiente orográfica.

La situación de invierno aquí analizada presenta varias semejanzas con las identificadas por Seluchi y Chou (2009) para el período lluvioso, como la presencia de un anticiclón barotrópico que tornó al patrón dominante más lento y persistente,

así como la interacción con perturbaciones de onda corta en los niveles altos que contribuyeron a la intensificación de las lluvias.

En un análisis futuro se pretende investigar con más detalle el papel que la Serra do Mar y la meseta central de Brasil ejercen sobre el pasaje de los sistemas frontales sobre el centro-sur de Brasil.

Agradecimientos: Este trabajo fue parcialmente financiado por la Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo (FAPESP) a través del Proyecto Temático 04/09649-0 y por el Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) a través de los proyectos 490225/2008-0 (Prosul) y 305302/2006-0

5 REFERENCIAS

Black T.L., 1994: NMC Notes: The New NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. *Weather and Forecasting*, 9, 256-278.
Seluchi M.E., Chou, S.C., 2009: Synoptic patterns associated with landslide events in the Serra do Mar, Brazil, *Theoretical and Applied Climatology*, DOI 10.1007/s00704-008-0101-x.