

Previsibilidade da pressão atmosférica local a partir de flutuações altimétricas registradas no Oeste Paulista

Antonio Jaschke Machado
Depto. Geografia - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Filho, Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente
jaschke.machado@gmail.com

Resumo

Este artigo propõe a hipótese dos ciclos diário e sazonal da pressão atmosférica poder ser induzidos a partir da altitude local observada, revelado a partir da identificação de flutuações periódicas na altitude medida em relação ao nível do mar. Causa surpresa como a curva suavizada das flutuações na altitude assemelha-se ao ciclo diário da pressão atmosférica observada, apenas defasada por cerca de uma hora. Sugere-se que a localidade não permanece de fato fixa, mas, ao contrário, à deriva, tanto na direção vertical quanto na direção meridional, sujeita às interações gravitacionais do sistema Terra – Sol – Lua.

Palavras-chave: Gravitação, Problema dos três corpos, Hipsometria.

Abstract:

This paper proposes the hypothesis that the daily and seasonal cycles of the atmospheric pressure can be induced from the locally observed altitude, revealed from the identification of periodic fluctuations in the measured altitude above the sea level. Surprising about the smoothed curve of fluctuations in altitude resembles the daily cycle of observed atmospheric pressure, only lagged for about an hour. It is suggested that the site does not remain fixed, but instead drift, both in the vertical and in the meridian directions, subjected to the gravitational interactions of the Earth-Sun-Moon system.

Key-Words: : pGravitation, Three-bodies problem, Hypsometry.

O Sol e a Lua interagem gravitacionalmente com os corpos da Terra de forma facilmente perceptível. Desde tempos imemoriais a humanidade relaciona o fenômeno das marés à posição do sol e da Lua em relação à Terra. Tanto que dizemos “maré solar” e “maré lunar”. O que se descobriu depois é que o fenômeno da maré também ocorre na atmosfera e na litosfera. A pressão atmosférica sobre seu corpo aumenta e diminui duas vezes por dia e por isso ocorrem dois ciclos diários de regulação interna do organismo para compensar. A superfície sólida, incluindo você e tudo mais, sobe e desce duas vezes por dia cerca de 30 cm (AZEVEDO, 2006).

No meio do oceano, longe de qualquer terra, as marés têm pequeno desnível, cerca de 30 cm. Em baías fechadas, no entanto, elas podem atingir até, cerca de, 19,6 m, é o caso da baía de Fundy, no Canadá (BOCZKO, 1984). O movimento de um corpo em torno de outro suposto fixo é descrito por uma cônica. Quando o movimento dos corpos é em torno de um centro de massa comum, o movimento seria ainda uma cônica. Se dispusermos, no entanto, de três corpos gravitacionalmente ligados, o movimento será dito perturbado.

O clima não depende apenas de processos atmosféricos, mas também de processos físicos envolvendo outros componentes do sistema terrestre (WALLACE e HOBBS, 2006). A configuração atual de continentes, oceanos e cadeias de montanhas é uma consequência da deriva continental. As pronunciadas oscilações climáticas durante o período Quaternário acredita-se serem conduzidas por variações sutis na órbita da Terra.

A teoria da termodinâmica é um dos pilares da física clássica e tem aplicações nas ciências da Terra. Experimentos de laboratório mostram que a pressão, o volume e a temperatura de qualquer material relacionam-se por uma equação de estado sobre uma grande variedade de condições. Todos os gases seguem aproximadamente a mesma equação de estado, a qual se denomina equação ideal dos gases. Assume-se que a mistura dos gases atmosféricos obedece exatamente à equação ideal dos gases.

Ao trabalho que deve ser realizado contra o campo gravitacional terrestre, para elevar uma massa de 1 kg do nível do mar para qualquer ponto da atmosfera da Terra, denomina-se geopotencial. Em outras palavras, o potencial gravitacional por unidade de massa. Define-se uma grandeza chamada altura geopotencial, utilizada como coordenada vertical na maioria das aplicações atmosféricas nas quais a energia exerce um papel importante.

Por causa da diminuição monótona da pressão com a altura, as superfícies de pressão nunca se interceptam. Em regiões montanhosas a diferença na pressão superficial de uma estação meteorológica para a outra é amplamente devida às diferenças na altitude. Para isolar a parte do campo de pressão devida à passagem dos sistemas meteorológicos, é necessário reduzir a pressão a um nível comum de referência. Para este propósito, o nível do mar é normalmente utilizado.

A hipótese a que se propõe investigar é a de possibilidade da estimativa do ciclo básico diário e sazonal da pressão atmosférica, a partir do registro ininterrupto da altitude local relativa ao nível do mar. Desde que, a altitude seja medida por um receptor de posição geográfica de resposta rápida, conectado a um sistema automático de aquisição de dados e seja aplicada uma alta frequência de aquisição e armazenamento de dados.

Base física

A densidade do ar diminui com a altitude da mesma maneira que pressão. A pressão do ar a certa altitude na atmosfera deve-se à força exercida, por unidade de área, pelo peso de toda a coluna de ar acima daquela altitude. Se a força que age em uma parcela de ar, devido à diminuição da pressão atmosférica com a altitude, é igual à força de atração gravitacional que age na mesma parcela de ar, diz-se que a atmosfera está em equilíbrio hidrostático. À medida que a atração gravitacional varia, conforme a posição relativa entre a Terra, o Sol e a Lua se altera, a atmosfera, tão quais os oceanos e a crosta, ajusta-se de modo a recuperar o equilíbrio de forças que a mantém.

Na prática meteorológica não é conveniente lidar com a densidade de um gás. Ao fazer uso da equação do gás ideal elimina-se a densidade utilizando-se o conceito de geopotencial. Também é conveniente reter a constante dos gases para o ar seco e utilizar uma temperatura fictícia na equação do gás ideal, denominada temperatura virtual. A temperatura virtual é sempre maior do que a temperatura real, no entanto, mesmo para o ar muito quente e úmido, a temperatura virtual excede a temperatura real por somente alguns poucos graus.

Para uma atmosfera isotérmica, se a correção da temperatura virtual é desprezada, a espessura da camada atmosférica ($Z_2 - Z_1$) entre dois níveis de pressão (p_1 e p_2) torna-se:

$$(1).$$

A Equação 1 é denominada equação hipsométrica, onde g é a escala de altura da atmosfera. Neste estudo assume-se $p_1 = 1013 \text{ hPa}$ e $g = 9 \text{ km}$. Também é assumido que na troposfera a altura geopotencial é praticamente coincidente com a altura geométrica, além de se desprezar de modo geral a diferença entre a temperatura local e a temperatura ao nível do mar.

Se os processos naturais fossem rigorosamente periódicos seria simples descrevê-los matematicamente. Obviamente, a atmosfera exhibe variações e flutuações que são irregulares. Esta incerteza é o fio condutor por detrás do armazenamento e análise dos dados. Ao procurar relacionar as variações da pressão atmosférica às variações da altitude em relação ao nível do mar, geradas pelas forças de maré entre os corpos celestes, pretende-se reduzir parte da incerteza sobre as variações da pressão atmosférica. Outra parte está, inexoravelmente, atrelada à sazonalidade dos eventos sinópticos, que por ora não abordaremos neste estudo.

A análise dos dados algumas vezes implica em comparar séries com resoluções temporais distintas, é o caso deste estudo em que as séries de altitude têm resolução maior do que as séries de pressão. A técnica gráfica utilizada aqui procura aplicar uma suavização da densidade do núcleo de dados de altitude, de modo a gerar uma curva formalmente comparável à curva de pressão. O polinômio interpolador utilizado para se chegar a esta curva é um polinômio de terceira ordem, obtido pelo procedimento denominado Savitzky-Golay (WILKS, 2006). A tomada de decisão é feita em função do cálculo do coeficiente de determinação da regressão linear, entre a pressão atmosférica e a altitude, em um primeiro momento medida instantaneamente, em uma segunda etapa interpolada a partir dos dados originais.

Breve caracterização da localidade

O Oeste Paulista é a mais ocidental de todas as regiões do Estado de São Paulo e está localizada na confluência do vale do rio Paranapanema com o vale do rio Paraná. A cidade mais populosa na área estudada é Presidente Prudente (22°07'47"S, 51°24'31"W), situada a aproximadamente 600 km do Oceano Atlântico e localizada a aproximadamente 430 m acima do nível do mar. Abrange uma área municipal de aproximadamente 562 km², onde vivem mais de 220 mil habitantes (IBGE 2015) adensados no interior de uma malha urbana de cerca de 30 km².

A Figura 1 mostra os principais aspectos da superfície do terreno na área urbana de Presidente Prudente (Fig.1a), com destaque à micro bacia do córrego do Veado (Fig.1b), em cuja vertente sul localiza-se a estação meteorológica. A topografia foi amostrada e georreferenciada durante uma campanha em 2012. A área urbana mais adensada de Presidente Prudente localiza-se sobre um espigão.

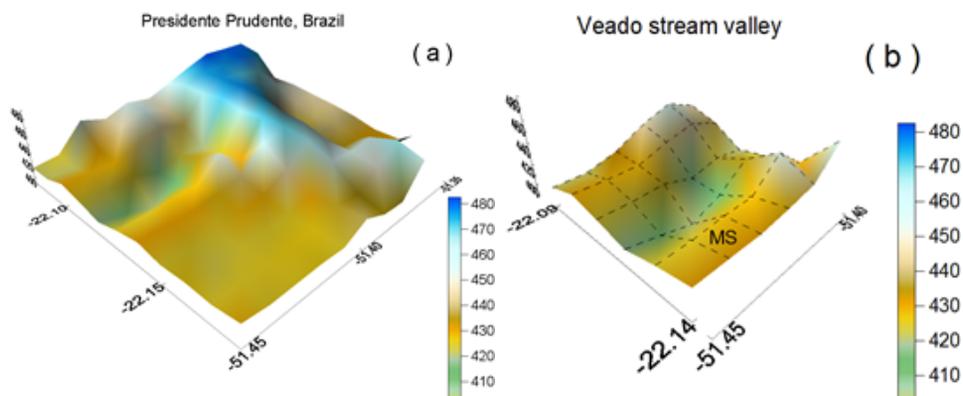


Figura 1. Localização geográfica e topografia amostrada em metros acima do nível do mar para a área urbana de Presidente Prudente (a) e a micro bacia do córrego do Veado (b) a noroeste da área urbana amostrada em Presidente Prudente, em cuja vertente sul localiza-se a Estação Meteorológica (MS).

Experimentos realizados

Uma campanha tem sido realizada para coletar dados, a partir de março de 2016. Os experimentos são realizados em uma determinada localidade de Presidente Prudente, a estação meteorológica da FCT-UNESP (Fig.2a). A estratégia utilizada foi a instalação de um receptor de posição geográfica (modelo GPS16X-HVS, Garmin International (GI), Lenexa, Kansas, USA) sobre o edifício sede da estação a uma altura de 4 m acima do chão (Figs.2c). Também estão instalados próximos ao receptor de posição (GI), um saldo-radiômetro (modelo NR-LITE-2, Kipp & Zonen (KZ), Amsterdam, Niederland), um pirgeômetro (modelo CGR4 (KZ)) e um termo-higrômetro (modelo HC2S3, Vaisalla (Va), Helsinki, Finland) (Fig.2b).

Séries temporais de dados para as coordenadas geográficas e a altitude acima do nível do mar foram registradas ininterruptamente nesta localidade desde março até outubro de 2016. Os dados foram adquiridos automaticamente com um sistema de aquisição de dados (modelo CR3000, Campbell Scientific Inc. (CS), Logan, Utah, USA) a uma frequência de 0,2 Hz e armazenados em intervalos de 5 min.

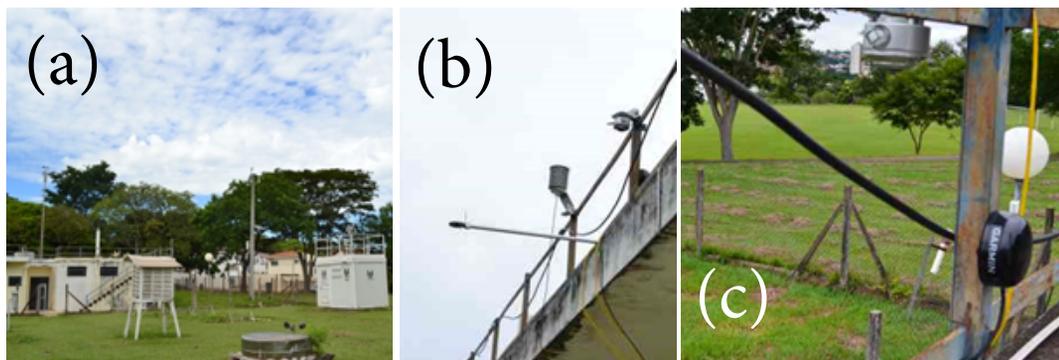


Figura 2. Estação meteorológica na FCT/UNESP (a), saldo-radiômetro, pirgeômetro, termohigrômetro (b) e receptor de posição geográfica (c) instalados e operando.

Marés em uma localidade no Oeste Paulista

Uma prova da existência das marés pode ser obtida por meio de observação das variações da altitude local, medida em relação ao nível médio do mar (Fig.3). Identifica-se a existência de quatro perturbações periódicas. A primeira com frequência de algumas horas e amplitude da ordem de alguns metros, possivelmente associada à maré da crosta terrestre e, sobretudo, à oscilação do centro de massa dos satélites de referência do GPS. A segunda com frequência de um dia e amplitude da ordem de 10 metros, possivelmente associada a uma interação, entre a maré oceânica, o que implica variação no nível de referência da superfície do mar, e, o centro de massa dos satélites, com máximo no zênite solar e mínimo no nadir solar. A terceira com frequência da ordem de um mês e amplitude da ordem de 5 metros, possivelmente associada às fases da lua. E, finalmente, uma quarta com frequência sazonal, podendo atingir em uma estimativa inicial amplitude máxima da ordem de 30 metros, possivelmente associada à órbita terrestre em relação à linha das apsidés, com máximo no periélio e mínimo no afélio. Esta quarta perturbação, de transição mais lenta, fica evidente ao observarmos, por exemplo, a transição do equinócio de primavera, algumas semanas antes (Fig.3a) e algumas semanas após (Fig.3b), durante a qual nota-se a elevação da altitude conforme se aproxima o solstício de verão.

A Figura 3 ainda mostra o nível de pressão local estimado a partir dos registros instantâneos da altitude local, aplicando-se a equação hipsométrica. As mesmas quatro perturbações também podem ser identificadas, porém, com uma amplitude bem mais reduzida em relação à escala linear. As máximas amplitudes estima-se da ordem de 1 a 2 hPa, associadas ao ciclo diário e à transição sazonal entre o periélio e o afélio. De modo geral, estima-se um nível de pressão médio local da ordem de 965 hPa, em consonância aos registros gráficos, não apresentados aqui, obtidos sistematicamente pelos barógrafos e que também indicam um valor intermediário das oscilações gerais da pressão atmosférica, desta magnitude. Percebe-se também uma relativa coerência entre as variações sazonais da altitude local e do nível de pressão estimado, à medida que a altitude média eleva-se de agosto para outubro, o nível de pressão apresenta uma ligeira queda, o que faz sentido se imaginarmos o caso em que se sobe uma montanha. Na situação investigada, é como se à medida que a superfície eleva-se, a atmosfera escoasse pelas bordas. Esta relação é bem mais evidente se observarmos os resultados da Figura 4.

Na Figura 4 as variações descritas na Figura 3 podem ser observadas em detalhe, para as mesmas épocas do ano, contudo, limitando-se a análise ao ciclo diário. Também à análise é agregada a pressão atmosférica observada próximo à superfície. Nota-se que, além da redução da magnitude da pressão atmosférica associada à elevação da altitude, torna-se bastante nítida outra variação periódica relacionada ao efeito da maré atmosférica, com seus dois máximos bem definidos durante a madrugada e início da tarde, e, os dois mínimos no início da manhã e no início da noite. Todavia, chega a parecer desconcertante, como a oscilação da pressão atmosférica, nesta escala de análise, assemelha-se à oscilação da altitude local com seus máximos e mínimos principais praticamente coincidentes, sugerindo-se, como que uma deriva vertical, inversa entre ambos, à medida que se transita para além do equinócio. Também é percebido, de maneira mais sutil, uma breve deriva temporal da ordem de uma hora, no mesmo sentido para ambos os casos, possivelmente, efeito da ação um pouco mais tardia da maré atmosférica em relação aos outros componentes do sistema terrestre.

Apesar deste resultado inesperado da aparente coerência entre a variação da pressão atmosférica e a variação da altitude local, uma primeira averiguação estatística elementar empregando-se o cálculo do coeficiente de regressão linear (Fig.5), confirma certa relação entre os dados, principalmente para o dia Juliano 223 (Fig.5a), mas não chega a causar surpresa tanto quanto à aparente similaridade das duas curvas. Possivelmente, porque os dados instantâneos não são exatamente coincidentes, a frequência de amostragem da altitude é superior à frequência de amostragem da pressão atmosférica, levando à identificação de perturbações menores na amplitude altimétrica não aparentes, ou suavizadas pela baixa amostragem dos dados, na curva da pressão atmosférica. Além disso, deve-se também levar em consideração a aparente deriva temporal da pressão atmosférica em relação à altitude. Um meio de tentar refinar a análise, já que não é possível reconstituir uma série temporal mais detalhada da pressão atmosférica, seria filtrar as oscilações de maior frequência da curva da altitude local, procurando relacioná-la de modo mais coerente às observações da pressão atmosférica.

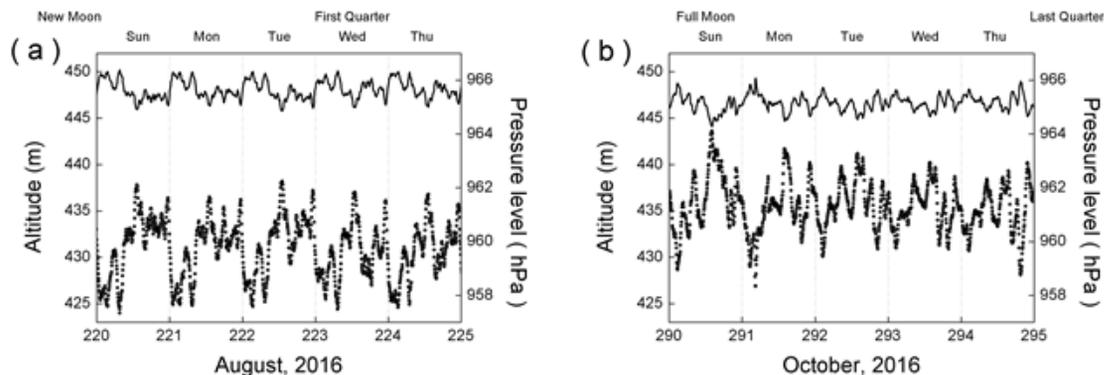


Figura 3. Variações periódicas da altitude local (círculos) acima do nível médio do mar e do nível de pressão (linha) em relação a uma altura geopotencial equivalente, durante o mês de agosto (a) e durante o mês de outubro (b) de 2016.

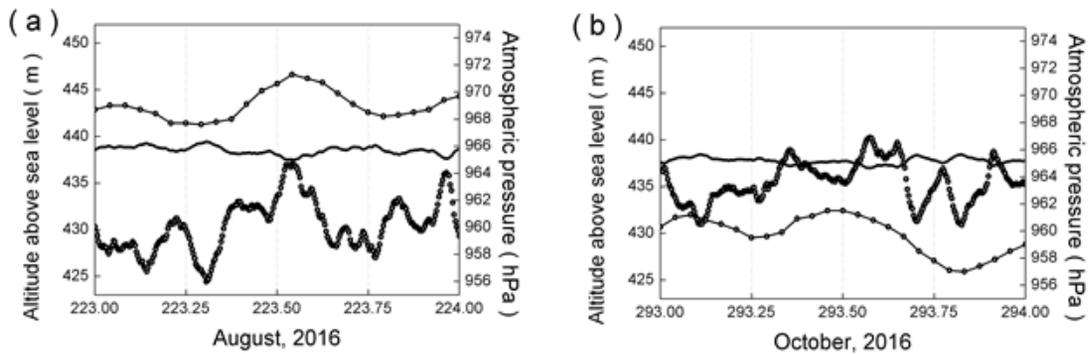


Figura 4. Variação diária da altitude local (círculos) acima do nível médio do mar, do nível de pressão (linha) em relação a uma altura geopotencial equivalente e da pressão atmosférica local (linha e círculos) registrada a 1,5 m acima do chão, durante um dia de agosto (a) e durante um dia de outubro (b) de 2016.

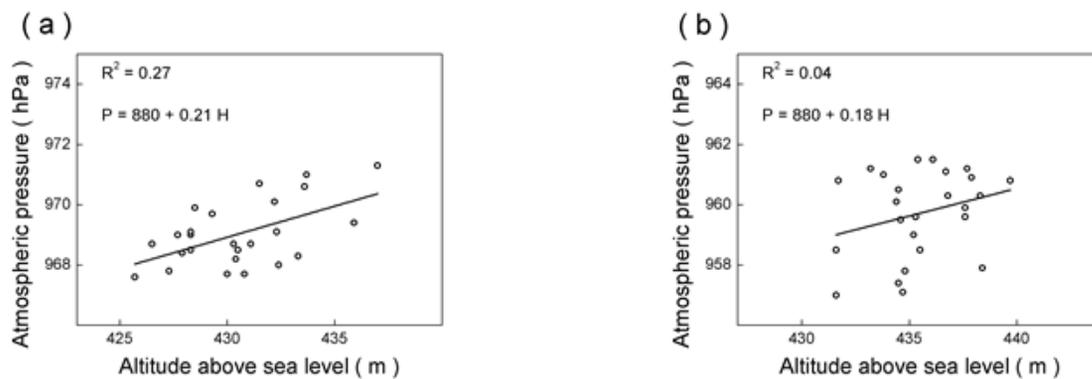


Figura 5. Relação entre a pressão atmosférica local e a altitude local acima do nível do mar para os dias 223 (a) e 293 (b) do ano de 2016.

Deriva da localidade

Ao se filtrar as oscilações de frequência mais alta da curva de altitude obtém-se uma segunda curva suavizada, muito semelhante à curva da pressão atmosférica (Fig.6). Esta curva suavizada é obtida utilizando-se um polinômio de terceira ordem de Savitzky-Golay, interpolado aos dados originais. Transladando-se a curva polinomial uma hora adiante, 15 metros para cima (Fig.6a) e 5 metros para baixo (Fig 6b), ela fica a uma posição muito próxima da curva da pressão atmosférica. De fato, recalculando-se o coeficiente de correlação linear entre a pressão atmosférica e a altitude trasladada, nota-se em ambos os casos um aumento em R2 (Fig 7), sobretudo, no dia 223 (Fig 7a) com R2 = 0,75.

De modo análogo à deriva vertical, percebe-se ainda a ocorrência da deriva também no plano horizontal, em relação à direção meridional (Fig.6). No dia 293 (Fig.6b) a latitude local é da ordem de 3 milésimos de minuto menor do que no dia 223 (Fig.6a), indicando uma deriva consistente para o uma localidade no hemisfério sul, de alguns metros para o norte, á medida que se passa pela pelo equinócio rumo ao periélio. O mesmo não se observa na direção zonal, com as oscilações na longitude local apresentando certa aleatoriedade.

A partir do período de 70 dias investigado, entre os dias 223 e 293, justamente na fase de transição do equinócio de primavera, entre o afélio e o periélio, induz-se um ciclo anual completo da deriva vertical. Segundo este ciclo, a altitude média na localidade investigada em relação ao nível do mar chega a variar 30 metros, sendo mais baixa no solstício de inverno e mais elevada no solstício de verão. Analogamente, porém mantendo-se uma relação inversa, a pressão atmosférica média na localidade investigada chega a variar 21 hPa, sendo mais elevada no solstício de inverno e mais baixa no solstício de verão, chegando-se à seguinte relação entre a deriva da pressão atmosférica (PD) e a deriva da altitude (HD):

$$PD = 0,7 HD \quad (2).$$

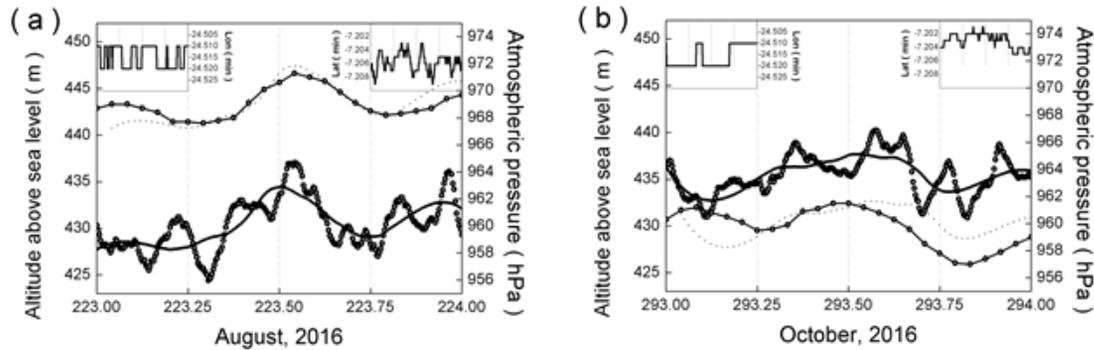


Figura 6. Variação diária da altitude local (círculos) acima do nível médio do mar, da pressão atmosférica local (linha e círculos), do polinômio de suavização de Savitzky-Golay (linha contínua) e do polinômio transladado (linha pontilhada), durante os dias 223 (a) e 293 (b) do ano de 2016. No canto superior esquerdo a variação diária da longitude local e no canto superior direito a variação diária da latitude local.

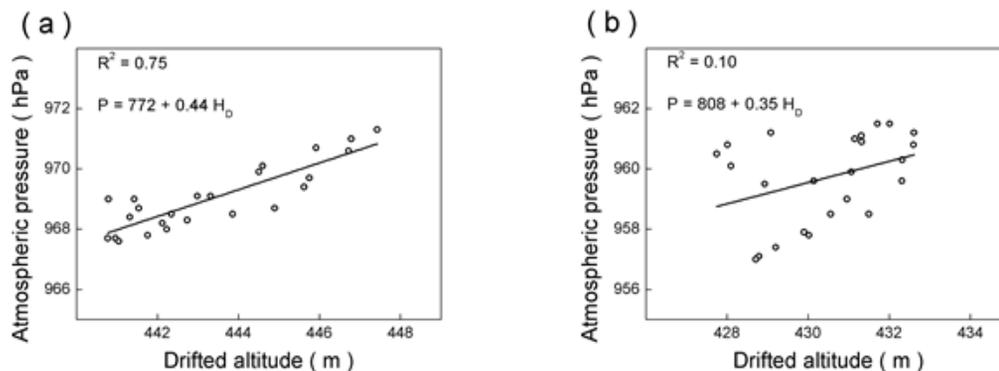


Figura 7. Relação entre a pressão atmosférica local e a altitude transladada para os dias 223 (a) e 293 (b) do ano de 2016.

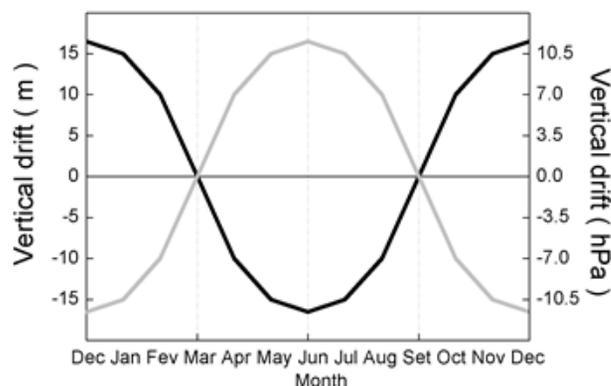


Figura 8. Ciclos para o período anual da deriva vertical, em função das variações na altitude local (linha escura) e na pressão atmosférica (linha clara).

Conclusões

Com os resultados e argumentos apresentados, demonstra-se que, no caso de uma localidade no hemisfério sul, durante a transição do equinócio de primavera, há deriva espacial desta localidade, para cima e para o norte. Induz-se que esta deriva é cíclica, com periodicidade anual e mantém uma relação inversa com o ciclo da pressão atmosférica média. Aplicando-se a equação hipsométrica para a altitude local, a partir da consideração de que a altura geométrica é aproximada igual à altura geopotencial, demonstra-se que o nível de pressão local possui magnitude coerente à variação sazonal da pressão atmosférica observada próximo à superfície.

Considerando-se que os resultados deste estudo são polêmicos, resta demonstrar a validade geral desta relação para um conjunto de estações geodésicas fixas, com registros sistemáticos e distribuídos por toda a Terra. Também é necessário entender em detalhes como funciona o sensor GPS16X-HVS, bem como o algoritmo que é utilizado no CR3000 para produzir os registros de altitude. Deve-se ainda realizar uma revisão bibliográfica aprofundada na literatura geodésica, a fim de se verificar a ocorrência de magnitudes semelhantes.

Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por fornecer suporte financeiro (proc. no. 2011/08520-8), ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) por fornecer os dados de pressão atmosférica e aos revisores anônimos cujos comentários ajudaram a melhorar este artigo.

Referências Bibliográficas

Azevedo, T. R. de, 2006. A interferência dos astros em sua vida. Revista do Departamento de Geografia 18, 42-47.

Boczko, R., 1984. Conceitos de astronomia. São Paulo: Edgard Blücher.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015.

Disponível em < <http://www.censo2014.ibge.gov.br/> >.
Acessado em 3 de julho de 2015

Wallace, J. M.; Hobbs, P. V., 2006. Atmospheric science – an introductory survey. 2nd edition. London: Academic Press.

Wilks, D. S., 2006. Statistical methods in the atmospheric sciences. 2nd edition. London: Academic Press.