

Qual é o efeito da resolução radiométrica na estimativa da concentração de sedimentos suspensos via dados orbitais? Experimento com modelos da bacia amazônica

Otávio Cristiano Montanher ¹
Evelyn Márcia Leão de Moraes Novo ²
Cláudio Clemente Faria Barbosa ²

¹ Universidade Estadual de Maringá – UEM
Av. Colombo, 5.790, Jardim Universitário, Maringá, PR, Brasil.
Programa de Pós-graduação em Geografia; GEMA – Grupo de Estudos Multidisciplinares do Ambiente - otaviocmontanher@yahoo.com.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
evlyn@dsr.inpe.br; claudio@dpi.inpe.br

Abstract. Recently were developed empirical models for estimation of suspended sediment concentration (SSC) in Amazonian rivers optically dominated by suspended sediments, typically the white waters, from Landsat 5/TM radiometric data. Taking into account the well-know limitations of TM sensor concerning radiometric resolution, some questions have emerged: how these models are affected by radiometric discretization? How is the estimation performance by supposing different radiometric resolutions? So, this paper has the following objectives: i) to account the SSC estimative errors of empirical models of Amazonian with water rivers, originated only from radiometric discretization of TM sensor; and ii) to simulate the estimative errors for other radiometric resolution. The experiment includes: the TM sensor (which is the data used for the modeling in the original models), MSS - 7 bits - MODIS - 10 bits - OLI - 12 bits and ALI - 15 bits. As assumed in the hypothesis, our results show that an increase in the radiometric resolution induces an increase in the estimation accuracy. The results show great estimation errors from MSS and TM radiometric resolution, while MODIS, OLI and ALI sensors have an accurate estimation. Although the using of 12 and 15 bits of resolution makes high accuracy SSC estimation, when one take into account the following constraints of remote sensing data: acquisition, transmission, storage, distribution and processing, the 10 bits resolution seems to be more appropriate for the application presented in this study.

Palavras-chave: sensor attributes, empirical modelling, TOA reflectance, MODIS, MSS, OLI, atributos do sensor, modelagem empírica, reflectância no topo da atmosfera, MODIS, MSS, OLI.

1. Introdução

A resolução radiométrica é um importante atributo de um sensor orbital. O nível de detalhe no qual o sensor codifica o sinal analógico em números digitais (ND), que correspondem a valores de radiância espectral (L_{λ}), pode ser um fator restritivo ao uso dos dados orbitais, caso o campo de aplicação exija uma aproximação mais precisa do sinal radiante real em relação à que o sensor oferece.

Muitas aplicações são severamente afetadas devido à baixa resolução radiométrica dos sensores utilizados. O IAF (índice de área foliar), por exemplo, é um parâmetro biofísico da vegetação que é obtido com maior precisão com sensores de maior resolução radiométrica. Estudos que envolvem o uso de sensores orbitais para estimativa de parâmetros de qualidade d'água são especialmente afetados pela resolução radiométrica do sensor devido ao típico baixo sinal de retorno deste objeto. Apesar de ser um sensor de baixa resolução radiométrica, o sensor TM (8 bits) tem sido utilizado com sucesso em estudos de avaliação da qualidade d'água desde a década de 1980. A principal aplicação do sensor TM, em seu projeto inicial, é para o monitoramento do uso e cobertura do solo, essencialmente para agricultura. Por causa disso, a posição das bandas espectrais foi projetada principalmente para avaliação do vigor da vegetação, além do fato de que sua resolução radiométrica viabiliza muitas análises deste alvo.

Recentemente foram desenvolvidos modelos empíricos para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) em rios da bacia amazônica que são opticamente controlados por sedimentos suspensos, tipicamente as águas brancas, a partir de imagens Landsat 5/TM (Montanher, 2013; Montanher et al., 2014). Dadas as limitações do sensor TM em termos de resolução radiométrica, surgiram as seguintes dúvidas: Como as estimativas seriam caso o sensor possuísse diferentes resoluções radiométricas? Quanto maior a resolução radiométrica mais precisa é a estimativa? A partir de algum patamar o aumento da resolução radiométrica seria desnecessário? Dadas essas questões, este trabalho tem como objetivos: i) calcular os erros de estimativa da CSS dos modelos empíricos dos rios amazônicos de águas brancas, que são provenientes da discretização radiométrica do sensor TM; ii) simular como seriam esses erros para outras resoluções radiométricas.

2. Metodologia

2.1 Modelos empíricos

Os modelos para estimativa da CSS em rios amazônicos de águas brancas, avaliados neste artigo, estão apresentados em maior detalhe em Montanher et al., (2014). No total, são cinco modelos classificados de acordo com as características das áreas de drenagem à montante das estações de amostragem utilizadas para modelagem. Esses modelos foram desenvolvidos a partir do uso de regressão multivariada entre dados coletados em 23 estações de amostragem *in situ* e a reflectância do topo da atmosfera, ou reflectância aparente (ρ_{apa}), derivada a partir de dados radiométricos TM.

Para avaliação dos erros em função de diferentes resoluções radiométricas, foram utilizados cinco casos, em que dois são do modelo rio Amazonas (eq. 1) e três são do modelo rio Beni (eq. 2):

$$CSS = \left(25,26 - 2,62\rho_2 + 1,87\rho_3 + 1,72\rho_4 - 0,92\rho_5 + 27,9\frac{\rho_3}{\rho_1} - 11,78\frac{\rho_4}{\rho_3} - 81,23\frac{\rho_3}{\rho_2 + \rho_1} \right)^2 \quad (1)$$

$$CSS = \left(-50,05 - 0,31\rho_5 + 150,07\frac{\rho_3}{\rho_2} + 57,72\frac{\rho_2}{\rho_1} - 16,53\frac{\rho_4}{\rho_3} - 355,59\frac{\rho_3}{\rho_2 + \rho_1} + 44,3\frac{\rho_4 + \rho_3}{\rho_2 + \rho_1} \right)^2 \quad (2)$$

onde ρ_1 é a reflectância aparente (ρ_{apa}) para a banda espectral do azul; ρ_2 é a ρ_{apa} para a banda espectral do verde; ρ_3 é a ρ_{apa} para a banda espectral do vermelho; ρ_4 é a ρ_{apa} para a banda espectral do infravermelho próximo; ρ_5 é a ρ_{apa} para a banda espectral do infravermelho de ondas curtas em 1,676 μm .

2.2 Dependência da ρ_{apa} em relação ao ND

Os valores de ρ_{apa} foram calculados a partir dos valores de L_λ , (Chander et al., 2009):

$$\rho_{apa} = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot d^2}{ESUN_\lambda \cdot \cos\theta_s} \quad (3)$$

onde L_λ é a radiância spectral no sensor [$W/(m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$]; d é a distância terra-sol (unidades astronômicas); θ_s é o ângulo solar zenital e $ESUN_\lambda$ é a irradiância incidente no topo da atmosfera [$W/(m^2 \mu\text{m})$].

A ρ_{apa} promove uma redução da variabilidade entre diferentes cenas (Chander et al., 2009). Ao se comparar imagens de diferentes datas, essa conversão remove o efeito cosseno de diferentes ângulos solares zenitais e corrige a variação dada pela distância terra-sol (Chander et al., 2009). Os valores de L_λ são calculados a partir dos números digitais (ND) - (Markham e Barker, 1986):

$$L_\lambda = \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{ND_{\max} - ND_{\min}} \right) (ND_\lambda - ND_{\min}) + LMIN_\lambda \quad (4)$$

onde ND_{\max} é o ND máximo; ND_{\min} é o ND mínimo; $LMAX_\lambda$ é a radiância spectral no sensor relacionada ao ND_{\max} ($W/m^2 \text{ sr } \mu\text{m}$), e $LMIN_\lambda$ é a radiância spectral no sensor relacionada ao ND_{\min} ($W/m^2 \text{ sr } \mu\text{m}$).

As equações 3 e 4 mostram que, além de normalizações geométricas da irradiância incidente, presentes na equação 3, a ρ_{apa} é relacionada com a L_λ , a qual, por sua vez, é proporcional aos NDs.

2.3 Simulação dos erros para o sensor TM

A estimativa da CSS a partir dos modelos propostos, utilizando-se dados orbitais, é feita a partir da seguinte seqüência:

$$ND_\lambda \rightarrow L_\lambda \rightarrow \rho_{apa(\lambda)} \Rightarrow CSS_{ER} \quad (5)$$

onde CSS_{ER} é a estimativa real da CSS.

As duas primeiras conversões foram descritas nas equações 3 e 4, e são facilmente calculadas (Chander et al., 2009), enquanto que a última conversão utiliza os modelos de Montanher et al., (2014), descritos nas equações 1 e 2. Uma limitação inerente a esse procedimento é o erro da estimativa da radiância, porque os valores de ND são discretos. As medidas reais da radiância, feitas pelos detectores, são transformadas em valores discretos por uma aproximação simples de $-0,5 \leq x \leq 0,5$ ND. Como não há valores preferenciais nessa aproximação, assumiu-se que sua distribuição é uniforme. O valor real de um determinado ND contínuo (teórico) não é conhecido, o que impossibilita o cálculo do erro de estimativa real, mas podem ser realizadas n simulações a partir de valores de ND alterados no limite entre $\pm 0,5$, de forma aleatória:

$$(-0,5 \leq x \leq 0,5) + ND_\lambda \rightarrow L_{S(\lambda)} \rightarrow \rho_{apa_S(\lambda)} \Rightarrow CSS_{ES} \quad (6)$$

Onde $L_{S(\lambda)}$ é a radiância simulada; $\rho_{apa_S(\lambda)}$ é a ρ_{apa} simulada, e CSS_{ES} é a estimativa simulada da CSS.

Portanto, para calcular os erros de estimativa da CSS, provenientes da discretização radiométrica, foram realizadas 10.000 simulações de interferências de $-0,5 \leq x \leq 0,5$ nos valores originais de ND, utilizando uma distribuição uniforme para cada banda espectral separadamente. A partir desses valores simulados de ND são gerados valores simulados de ρ_{apa} ($\rho_{apa_S(\lambda)}$), os quais, por sua vez, são usados como entrada nos modelos de Montanher et al., (2014). Os erros de estimativa ligados com a discretização radiométrica são obtidos por meio da diferença simples entre a CSS_{ES} e a CSS_{ER} .

2.4 Simulação dos erros para outras resoluções radiométricas

É frequente na literatura a crítica à resolução radiométrica do sensor TM (8 bits) para avaliação de corpos hídricos. Então avaliou-se o quanto uma mudança na resolução radiométrica altera os erros de estimativa da CSS. Nesse experimento foram incluídos exemplos de sensores de resolução radiométrica mais refinada: MODIS, OLI e ALI (respectivamente: 10, 12 e 15 bits), e o sensor MSS, de 7 bits. Enquanto que os experimentos com resoluções mais detalhadas permitem a avaliação do potencial da nova geração de sensores, por outro lado o experimento com o sensor MSS mostra suas limitações em relação ao sensor TM.

O intervalo de intensidade das medidas da radiância no sensor é definido pelos parâmetros de $LMIN_{\lambda}$ e $LMAX_{\lambda}$, com números digitais correspondentes (respectivamente ND_{min} e ND_{max}). Para um mesmo intervalo de sensibilidade radiométrica, quanto maior a resolução radiométrica, maior é a sensibilidade a pequenas variações do sinal. Em consequência, assume-se como hipótese que uma maior resolução radiométrica é capaz de fornecer estimativas mais precisas da CSS. A radiância medida pelo sensor TM em cada banda espectral foi assumida como a radiância real. Então uma transformação linear foi aplicada para converter o valor real de ND, relacionado aos 256 níveis números digitais para um ND de outras resoluções radiométricas, utilizando os mesmos valores de $LMIN_{\lambda}$ e $LMAX_{\lambda}$:

$$\text{Para } A = \{7, 10, 12, 15\} \text{ com } x \in A: ND_{\lambda x} = (ND_{\lambda} / 255) * (2^x - 1) \quad (7)$$

Onde $ND_{\lambda x}$ é o número digital convertido para uma resolução radiométrica x .

Utilizando esse novo número digital reescalado, foram feitas novamente 10.000 simulações de interferências de acordo com a eq. 6. Para representação dos resultados das 10.000 de cada experimento, foram elaborados gráficos do tipo *box plot*, com mediana, segundo e terceiro quartis e intervalo de *outliers* dos erros de estimativa. Também são apresentadas, em tabelas, as estatísticas descritivas de cada experimento.

3. Resultados e discussões

Os dois experimentos com o modelo para o rio Amazonas mostram que os erros estimados distribuem-se de forma simétrica, com medianas próximas a zero e centradas nos intervalos interquartis (Figura 1). Já para o modelo rio Beni, os erros positivos e negativos estão desproporcionalmente distribuídos, tendendo para superestimação, em que são observados outliers em todas as simulações apenas para valores positivos. A análise da Figura 1 também mostra que, em conformidade com a hipótese levantada, os erros de estimativa devidos apenas à resolução radiométrica diminuem concomitantemente com o aumento da resolução radiométrica (ou com o número de bits).

As simulações para a resolução radiométrica do sensor MSS mostram erros de grande escala, que diminuem de forma substancial para o sensor TM. Quando ambos os erros são

comparados com a resolução de 10 bits do sensor MODIS, novamente há uma diminuição importante desses erros. Ao contrário, as simulações para 12 e 15 bits mostram que não há um ganho tão grande em precisão como em comparação com as resoluções mais grosseiras (idéia expressa graficamente na Figura 1; dados disponíveis nas Tabelas 1, 2, 3, 4 e 5).

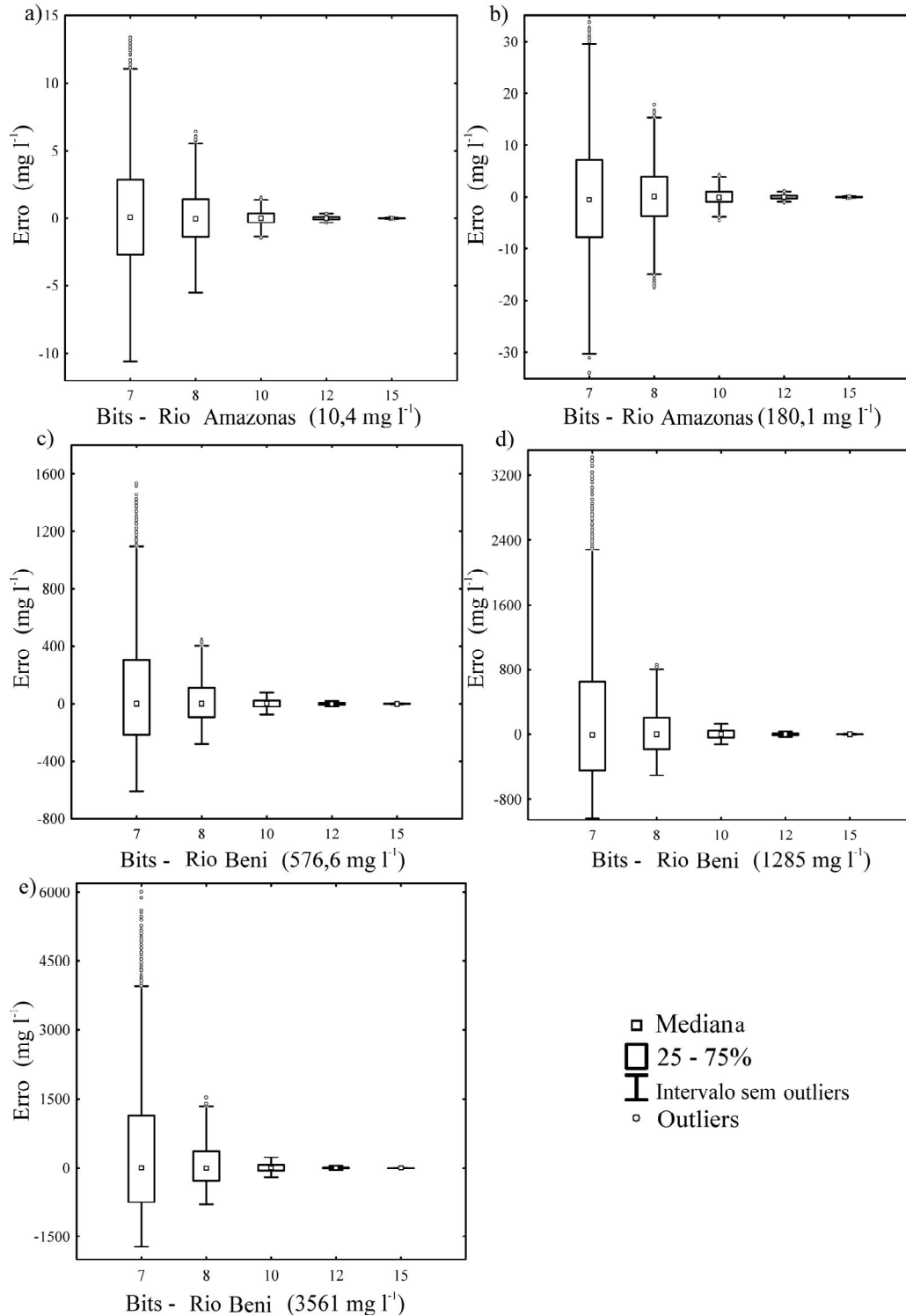


Figura 1. Resultados dos erros de estimativa da CSS simulados a partir das interferências artificialmente induzidas, de forma aleatória, nos números digitais.

Tabela 1 – Estatísticas descritivas dos erros de estimativa simulados para o modelo do rio Amazonas (CSS = 10,4 mg/l)

Erro de estimativa	Resolução				
	7 bits	8 bits	10 bits	12 bits	15 bits
Média	3,17	1,63	0,4	0,1	0,012
Média (%)	30,48	15,7	3,85	0,96	0,12
Desvio padrão	2,3	1,17	0,29	0,072	0,009
Mínimo	0,001	3,95E-05	5,21E-06	3,4E-05	1,2E-07
Máximo	13,38	6,39	1,56	0,38	0,048

Tabela 2 – Estatísticas descritivas dos erros de estimativa simulados para o modelo do rio Amazonas (CSS = 180,1 mg/l)

Erro de estimativa	Resolução				
	7 bits	8 bits	10 bits	12 bits	15 bits
Média	8,58	4,42	1,11	0,27	0,03
Média (%)	4,76	2,45	0,61	0,15	0,01
Desvio padrão	6,15	3,17	0,8	0,2	0,02
Mínimo	0,003	0,0003	0,0002	4,16E-06	4,06E-07
Máximo	33,97	17,76	4,54	1,14	0,14

Tabela 3 – Estatísticas descritivas dos erros de estimativa simulados para o modelo do rio Beni (CSS = 576,6 mg/l)

Erro de estimativa	Resolução				
	7 bits	8 bits	10 bits	12 bits	15 bits
Média	298,6	110,1	22,7	5,42	0,66
Média (%)	51,8	19,1	3,93	0,94	0,11
Desvio padrão	234,6	76,2	15,4	3,68	0,45
Mínimo	0,1	0,001	0,0007	0,004	8,95E-06
Máximo	1535,9	447,7	77,33	18,4	2,3

Tabela 4 – Estatísticas descritivas dos erros de estimativa simulados para o modelo do rio Beni (CSS = 1285 mg/l)

Erro de estimativa	Resolução				
	7 bits	8 bits	10 bits	12 bits	15 bits
Média	608,3	210,3	41,8	9,92	1,22
Média (%)	47,3	16,3	3,25	0,77	0,095
Desvio padrão	494,1	143,1	27,05	6,4	0,78
Mínimo	0,08	0,005	0,01	0,002	0,0001
Máximo	3419,3	858,9	132,4	30,9	3,86

Tabela 5 – Estatísticas descritivas dos erros de estimativa simulados para o modelo do rio Beni (CSS = 3561 mg/l)

Erro de estimativa	Resolução				
	7 bits	8 bits	10 bits	12 bits	15 bits
Média	1051,3	356,8	71,7	17,01	2,09
Média (%)	29,5	10,02	2,01	0,47	0,05
Desvio padrão	865,7	245,08	46,21	10,91	1,34
Mínimo	0,15	0,03	0,002	0,0002	0,0002
Máximo	6003,5	1531,03	227,7	51,4	6,43

Essa série de tabelas mostra que a resolução de 7 bits leva a erros muito importantes, os quais em média atingem entre 4 e 51,8% do valor real da CSS, dependendo do caso analisado. Ainda levando em conta a resolução do sensor MSS, erros extremos são encontrados quando observa-se os erros máximos. Utilizando o experimento do modelo rio Beni (Tabela 3), nota-se que o erro de 51,8%, para 7 bits, baixou para 19,1%, para 8 bits. Outra redução substancial dos erros de estimativa foi para a resolução de 10 bits: 3,93%. Já para as outras duas resoluções, os incrementos de precisão ainda continuam, mas considera-se que são menos importantes. Isso ocorre de forma semelhante para os outros modelos, em que há uma melhoria significativa de 7 para 10 bits, mas o incremento adicional de resolução radiométrica não promoveu grandes diferenças, pois as estimativas já eram muito precisas utilizando-se um sensor de 10 bits.

Um ponto importante à ser ressaltado na análise desses resultados, é que este experimento não levou em conta a relação sinal-ruído dos sensores. Com o intuito de simplificação experimental, assumiu-se que a relação sinal-ruído manteve-se constante entre as resoluções avaliadas. Na prática, ao se projetar um sensor, a relação sinal-ruído deteriora-se a medida que aumenta-se a resolução radiométrica, sendo necessário encontrar um balanço entre esses parâmetros. Essa variável pode ser analisada, de forma que a proporção sinal-ruído pode ser computada de forma semelhante ao que foi feito na eq. 6.

4. Conclusões

- O aumento da resolução radiométrica levou ao aumento da precisão das estimativas;
- Sensores de baixa resolução radiométrica como o MSS e o TM possuem importantes erros de estimativa associados com a aproximação dos NDs;
- A resolução radiométrica do sensor MODIS levou a estimativas precisas da CSS, embora não tão refinadas quanto às fornecidas pelas resoluções de 12 e 15 bits, mas levando em conta as diversas restrições em termos de aquisição, transmissão, armazenamento, distribuição e processamento de dados de sensoriamento remoto, a resolução de 10 bits mostrou-se satisfatória para a aplicação analisada neste estudo.

5. Referências

Chander, G., Markham, B.L., Helder, D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, v. 113, n. 5, p. 893–903, 2009.

Markham, B.L., Barker, J.L. **Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperature**. EOSAT Landsat Technical Notes, n.1, august, 1986. 8p.

Montanher, O.C. **Modelos empíricos para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão em rios amazônicos de águas brancas a partir de imagens Landsat 5**. 2013. 115 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2013.

Montanher, O.C., Novo, E.M.L.M., Barbosa, C.C.F., Rennó, C.D., Silva, T.S.F. Empirical models for estimating the suspended sediment concentration in Amazonian white water rivers using Landsat/TM. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 29, p. 67-77, 2014.