



Revista Brasileira de Agricultura Irrigada v.10, n<sup>o</sup>.1, p. 400 - 409, 2016  
ISSN 1982-7679 (On-line)  
Fortaleza, CE, INOVAGRI – <http://www.inovagri.org.br>  
DOI: 10.7127/rbai.v10n100321  
Protocolo 321.16 – 26/06/2015 Aprovado em 11/01/2016

## ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO EM ÁREAS IRRIGADAS SOB O CULTIVO DA CULTURA DO MILHO UTILIZANDO IMAGENS DE SATÉLITE

Leonel Aparecido Mardegan Oliveira<sup>1</sup>, Rodolfo Alves de Azeredo<sup>1</sup>, Glaucio Luciano Araújo<sup>2</sup>,  
Everardo Chartuni Mantovani<sup>3</sup>

### RESUMO

A cultura do milho no Brasil é a segunda mais plantada em área, sendo cultivada em todos os Estados brasileiros, dividida em primeira safra e safrinha. Como importante cultura para o cenário nacional, a estimativa de produção antes da colheita vem se tornando uma ferramenta importante para planejamento dos produtores para escoamento de safra, negociação da produção, entre outros. O presente trabalho teve como objetivo estimar a produtividade de áreas irrigadas sob o cultivo da cultura do milho, utilizando imagens de satélite através de um modelo multiespectral proposto por Araújo (2013), e então comparar os dados de produtividade obtidos com dados reais de campo. A resolução espacial permitiu identificar uma elevada gama de detalhes, proporcionando elevado nível de precisão às estimativas. O modelo quando comparado com valores de produção observados a campo, apresentou elevado coeficientes de determinação, indicando elevado grau de concordância entre valores estimados e observados. Verifica-se que a maior diferença entre as produtividades estimadas e observadas foi de 14%, e a menor, de 0,17%.

**Palavras-chave:** Sensoriamento remoto, *Zea mays* L., produtividade

## PRODUCTION ESTIMATE IN IRRIGATED AREAS UNDER MAIZE FARMING USING SATELLITE IMAGES

### ABSTRACT

The corn crop in Brazil is the second most planted in area, being cultivated in all Brazilian states, divided into first crop and second crop, formerly called off-season. As important crop to the national scene, the estimated production before harvest is becoming an important tool for planning of producers to harvest flow, negotiation of production, among others. This study aimed to estimate the productivity of irrigated areas under cultivation of maize, using satellite images through a multispectral model proposed by Araújo (2013), and then compare the productivity data obtained from actual field data.

<sup>1</sup>Acadêmico do curso de Agronomia, Universidade Federal de Viçosa. E-mail: leonel.oliveira@ufv.br ; rodolfo.azeredo@ufv.br.

<sup>2</sup>Doutorando em Engenharia Agrícola ; Universidade Federal de Viçosa. E-mail: glaucio.araujo@ufv.br

<sup>3</sup>Professor do Departamento de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa. E-mail: everardo@ufv.br

**Keywords:** Remote sensing, corn, productivity

## INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma das principais culturas do Brasil, sendo cultivada em todas as Regiões do País. O continente americano é responsável por cerca de 52% de todo milho produzido no mundo. Entre os países, o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho (EMBRAPA, 2012).

O milho pode ser cultivado em regiões onde as precipitações vão desde 250 mm até 5.000 mm anuais, sendo que a quantidade de água consumida pela planta durante seu ciclo está em torno de 600 mm (EMBRAPA, 2008). A ocorrência de déficit hídrico na cultura do milho pode ocasionar danos em todas as fases. Após o déficit hídrico, a produção de grãos é afetada diretamente, pois a menor massa vegetativa possui menor capacidade fotossintética. Déficit hídrico na fase de enchimento de grãos afetará o metabolismo da planta e o fechamento de estômatos, reduzindo a taxa fotossintética e, conseqüentemente, a produção de fotoassimilados e sua translocação para os grãos (EMPRAPA, 2008).

A produtividade das culturas é um dos elementos chave para o desenvolvimento rural sustentável e é um indicador da segurança alimentar de um País.

A estimativa do rendimento da cultura alguns meses antes da colheita é de suma importância e traz uma série de benefícios, como exemplo, permite saber se a safra suprirá a demanda nacional, também permite planejar o transporte da safra dentro do País ou de um País para outro de forma eficiente, permite a comercialização da safra antes mesmo da colheita.

Uma das formas de estimar a produtividade das culturas é por meio de modelos matemáticos. Um modelo muito conhecido e utilizado é o modelo que descreve o acúmulo de biomassa por meio do somatório ou acúmulo da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) multiplicado por um fator de eficiência de conversão da radiação em biomassa, proposto

por Monteith (1972); este modelo tem grande potencial, pois este pode ser aplicado em conjunção com dados de sensoriamento remoto.

Um dos principais parâmetros do modelo de Monteith (1972) é o fator de eficiência do uso da radiação, permitindo que ele possa ser acoplado ao modelo proposto por Field et al. (1995), promovendo a estimativa da eficiência do uso da radiação em função da eficiência máxima da cultura, da temperatura e de um fator dependente da umidade do solo, que pode ser substituído pela fração evaporativa.

A fração evaporativa por sua vez é estimada pela razão entre o fluxo de calor latente de evaporação pelo somatório do fluxo de calor sensível e do fluxo de calor latente de evaporação. Desta forma, a fração evaporativa é determinada por meio do balanço de energia, que pode ser realizado, por exemplo, utilizando o algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land).

O algoritmo SEBAL, que utiliza técnicas de sensoriamento remoto, foi formulado por Bastiaanssen et al. (1998a) e possibilita a estimativa do fluxo de calor latente (LE) por meio da utilização de imagens de satélites, como um resíduo da equação do balanço de energia, permitindo a estimativa da evapotranspiração da cultura. Ele é constituído, em sua grande parte, por parametrizações físicas bem estabelecidas, sendo que do total de passos existentes, poucos são aqueles que envolvem parametrizações empíricas.

As técnicas de sensoriamento remoto vêm sendo empregadas visando à predição da produtividade agrícola (BASTIAANSEN e ALI, 2003; SAMARASINGHE, 2003; FIELD et al., 1995; SAMARASINGHE, 2003; BRADFORD et al., 2005) os quais também utilizaram o modelo de Monteith (1972) na estimativa de produção de diversas culturas.

Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo estimar a produtividade de áreas irrigadas sob o cultivo da cultura do milho.

## MATERIAIS E MÉTODOS

ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO EM ÁREAS IRRIGADAS SOB O CULTIVO DA CULTURA DO MILHO  
UTILIZANDO IMAGENS DE SATÉLITE

Para a execução desta pesquisa alguns modelos foram acoplados, sendo o principal deles, um modelo que estima a biomassa produzida pelas culturas, em função da radiação absorvida pelas plantas, este modelo foi proposto por Monteith (1972). O modelo de Monteith é dependente de um fator que exprime a eficiência de conversão da energia luminosa em biomassa. Este fator foi estimado pelo modelo de Field et al. (1995), sendo que este é dependente da fração evaporativa. Por sua vez a fração evaporativa foi determinada por meio do algoritmo SEBAL (BASTIAANSEN et al., 1998a).

As áreas de estudo estão localizadas no Estado da Bahia, mais precisamente no

município de São Desidério, e pertencem a Fazenda Triflora (12°27'14" S; 45°41'16" O).

As imagens do satélite Landsat 5 sensor TM, para o período de estudo foram obtidas diretamente do site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) na internet, mediante a um cadastro e autorização do órgão. As imagens estão alojadas no catálogo de imagens, sendo que as imagens com cobertura de nuvens foram desconsideradas.

As imagens TM, do Landsat 5 são compostas de sete bandas espectrais, sendo seis bandas refletivas e uma termal (banda 6). Informações detalhadas de cada banda, juntamente com os coeficientes de calibração radiométrica estão na Tabela 1.

**Tabela 1.** Descrição das bandas do Mapeador Temático (TM) do satélite Landsat 5, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração (radiância mínima e máxima) e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera.

Bandas	Comprimento de Onda ( $\mu\text{m}$ )	Coeficientes de Calibração* ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ )		Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera ( $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ )
		Lmin	Lmax	
1 (azul)	0,45 – 0,52	-1,52	193,0	1957
2 (verde)	0,52 – 0,60	-2,84	365,0	1829
3 (vermelho)	0,63 – 0,69	-1,17	264,0	1557
4 (IV-próximo)	0,76 – 0,79	-1,51	221,0	1047
5 (IV-médio)	1,55 – 1,75	-0,37	30,2	219,3
6 (IV-termal)	10,4 – 12,5	1,2378	15,303	-
7 (IV-médio)	2,08 – 2,35	-0,15	16,5	74,52

\* Imagens datadas após 05/05/2003.

Fonte : INPE (2005)

Os dados climatológicos de superfície foram obtidos diretamente na Fazenda onde foi desenvolvido o experimento, os dados são referentes às seguintes variáveis: velocidade do vento a 2 metros de altura, radiação solar, temperaturas máxima e mínima, umidade relativa do ar e pluviometria. Estas variáveis foram coletadas por estações meteorológicas, automáticas pertencente à fazenda, a estação é da marca *Davis*, sendo do modelo *Vantage Pro*.

O papel do algoritmo SEBAL, foi possibilitar a determinação da fração evaporativa, necessária para a determinação da eficiência do uso da luz pela cultura.

O SEBAL utiliza informações da

superfície obtidas por sensoriamento remoto e dados meteorológicos para estimar as componentes do balanço de energia. A necessidade de informações multiespectrais e termais permite que o algoritmo seja aplicado somente a imagens adquiridas livres da cobertura de nuvens.

O fluxo de calor latente instantâneo (LE) foi estimado por meio da equação do balanço de energia, contabilizando a diferença entre o saldo de radiação ( $R_n$ ), o fluxo de calor no solo ( $G$ ) e o fluxo de calor sensível ( $H$ ). A descrição do algoritmo pode ser obtida em Bastiaansen et al. (1998 a, b), Allen et al. (2002) e Araujo (2013).

Após estimados LE,  $R_n$ ,  $G$  e  $H$  foi

possível calcular a fração evaporativa ( $\lambda$ ). A fração evaporativa descreve a partição do saldo de radiação em fluxo de calor latente e este processo de particionamento varia significativamente com as condições de umidade do solo (BRUTSAERT e SUGITA, 1992). A fração evaporativa é determinada pela razão entre o fluxo de calor latente e a soma entre o fluxo de calor latente e o fluxo de calor sensível, a fração evaporativa é aproximadamente constante durante o período diurno (SHUTTLEWORTH et al., 1989). A fração evaporativa foi calculada de acordo com a Equação 1.

$$\lambda = \frac{LE}{LE + H} = \frac{R_n - G - H}{(R_n - G - H) + H} = \frac{LE}{R_n - G} \quad (1)$$

A estimativa da biomassa acima do solo para a cultura do milho foi feita por meio do modelo de Monteith (1972) o qual também foi aplicado por Bastiaanssen e Ali (2003). Este modelo descreve o acúmulo de biomassa em função da radiação absorvida pela cultura (APAR) em um dado tempo (t) e de um fator de eficiência do uso da radiação ( $\varepsilon$ ), o modelo está representado na Equação 2:

$$\text{Bio} = \varepsilon * (\text{APAR}(t)) * 0,864 \quad (2)$$

Em que, Bio é a biomassa total acumulada ( $\text{kg ha}^{-1}$ ; matéria seca) no intervalo de tempo t,  $\varepsilon$  é o fator de eficiência de uso da radiação ( $\text{g MJ}^{-1}$ ), APAR é a radiação absorvida pela cultura ( $\text{Wm}^{-2}$ ) e o fator 0,864 é um fator de conversão que possibilita obter a biomassa em  $\text{kg ha}^{-1}$ .

Algumas melhorias do modelo de Monteith (1972) resultaram em termos de correção para as condições ambientais sobre a eficiência do uso da radiação, principalmente no

que diz respeito disponibilidade hídrica do solo e temperatura.

A eficiência do uso da luz é afetada diretamente pela umidade do solo, a qual é de difícil quantificação devido a sua distinta variabilidade espacial e temporal. Asrar et al. (1984), propuseram uma correção para o fator de eficiência em função do stress hídrico usando a temperatura da superfície como um indicador de umidade do solo, no entanto esta correção ficou restrita a áreas limitadas onde as condições climáticas e do solo são semelhantes. Field et al. (1995) desenvolveram um modelo de ecologia global mais abrangente para a correção do fator de eficiência do uso da radiação, que incorporara a seguinte formulação (Equação 3):

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} * T_1 * T_2 * \lambda \quad (3)$$

Em que,  $\varepsilon_{\max}$  é a máxima eficiência do uso da radiação, cujo valor utilizado para milho, conforme literatura, será de  $3,4 \text{ g MJ}^{-1}$  (BASTIAANSSEN e ALI, 2003),  $T_1$  é um fator que descreve os efeitos por causa do ar frio;  $T_2$  é um fator de redução da eficiência do uso da radiação devido ao ar quente e  $\lambda$  é a fração evaporativa.

A fração evaporativa é essencialmente controlada pela umidade do solo na zona radicular (BASTIAANSSEN et al., 1997). Medições de campo na cultura do trigo irrigado e lavouras de algodão no Paquistão confirmaram a relação entre a fração de evaporação e do solo e a umidade existente no mesmo.

O cálculo dos escalares de temperatura  $T_1$  e  $T_2$  serão dados pelas Equações 4 e 5 respectivamente (FIELD et al., 1995):

$$T_1 = 0,8 + 0,02 * T_{\text{opt}} - 0,0005 * T_{\text{opt}}^2 \quad (4)$$

$$T_2 = \frac{1}{1 + \exp(0,2 * T_{\text{opt}} - 10 - T_{\text{mon}})} * \frac{1}{1 + \exp(0,3 * (-T_{\text{opt}} - 10 - T_{\text{mon}}))} \quad (5)$$

Em que,  $T_{\text{opt}}$  é a temperatura média do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) durante o mês de máximo índice de área foliar ou NDVI;  $T_{\text{mon}}$  é a temperatura do ar

média mensal ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Para determinar a APAR primeiramente deve-se estimar a radiação fotossinteticamente

ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO EM ÁREAS IRRIGADAS SOB O CULTIVO DA CULTURA DO MILHO UTILIZANDO IMAGENS DE SATÉLITE

ativa ( $PAR, Wm^{-2}$ ) por meio da Equação 6:

$$PAR = 0,48 * K_{diario}^{\downarrow} \quad (6)$$

Em que,  $K_{diario}^{\downarrow}$  é a radiação solar global integrada para um período de 24 horas ( $Wm^{-2}$ , obtida na estação meteorológica). A equação, expressa a PAR como 48% da radiação de onda curta incidente num período de 24 horas. A radiação absorvida e utilizada pelos pigmentos da planta encontra-se na faixa correspondente ao espectro de luz visível (0,4 e 0,7  $\mu m$ ) e a radiação na faixa do infravermelho próximo é fortemente refletida pela vegetação.

Devido a esta absorção seletiva e reflexão pelas plantas, a combinação da reflectância do visível e do infravermelho próximo deu origem aos chamados índices de vegetação, sendo o NDVI um dos mais usados na estimativa da fração da radiação PAR absorvida pelo dossel das plantas (FPAR). Com base nesse conceito, determinou-se a FPAR por meio da expressão empírica sugerida por Daughtry et al. (1992) (Equação 7):

$$FPAR = -0,161 + 1,257 * NDVI \quad (7)$$

Após as estimativas de PAR e FPAR, pôde-se então determinar a APAR ( $Wm^{-2}$ ) empregando a Equação 8 (BASTIAANSSEN e ALI, 2003):

$$APAR = FPAR * PAR \quad (8)$$

Após aplicar o procedimento descrito, em cada uma das 3 imagens obtidas durante o ciclo da cultura foi possível quantificar a biomassa seca total produzida pela mesma. A conversão de biomassa seca total acumulada para produtividade foi realizada por meio da Equação 9 (BASTIAANSSEN e ALI, 2003):

$$Y_c = \frac{I_c * Biomassa_{total}}{1 - U_c} \quad (9)$$

Em que,  $Y_c$  é a produtividade da cultura ( $kg ha^{-1}$ );  $I_c$  é o índice de colheita, sendo utilizado o valor de 0,46 para o milho conforme sugerido por Bastiaanssen e Ali (2003) e  $U_c$  é a umidade no ponto de colheita sendo utilizado o valor de 0,20 para a cultura do milho.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As imagens a seguir, Figuras 1 e 2, demonstram o resultado da aplicação do modelo multiespectral nas imagens do sensor TM a bordo do satélite Landsat 5. Estas imagens apresentam os valores de biomassa total produzida no dia em que ocorreu o imageamento pelo sensor a bordo do satélite. As imagens apresentam, em cada pixel, valores de biomassa total em quilogramas por hectare, sendo a resolução de 8 bits totalizando 256 tons de cinza, que foram relacionados com valores de biomassa.



**Figura 1** Caracterização espacial da biomassa total produzida, pela cultura do milho na área de produção da Fazenda Triflora. Data do imageamento 12/08/2009.



**Figura 2** Caracterização espacial da biomassa total produzida, pela cultura do milho na área de produção da Fazenda Triflora. Data do imageamento 27/07/2009.

Nas Figuras 1 e 2, os locais que possuem maiores índices de área foliar, como as áreas sob os pivôs de irrigação, são mais claras, exprimindo maiores valores de biomassa produzida. Os círculos de coloração mais escura representam locais onde o solo foi recentemente preparado para plantio ou áreas onde o plantio ou colheita ocorreram recentemente.

A resolução espacial das imagens é de 30 x 30 metros, sendo a mesma resolução das imagens de satélite utilizadas no processo de modelagem. Esta resolução permitiu uma elevada gama de detalhes, trazendo alto nível de precisão às estimativas, fato este não observado quando se utiliza imagens de satélite, com menor resolução espacial. As técnicas de sensoriamento remoto são aprimoradas a cada

dia e fornecem informações precisas e valiosas, sendo que possuem elevado potencial na medição de parâmetros biofísicos, como exemplo, o índice de área foliar, permitindo a detecção da variabilidade tanto temporal, como espacial (MORAN et al., 1997; DAUGHTRY et al., 2000).

Na Tabela 2 apresenta-se os valores de produtividade de cinco pivôs de irrigação selecionados para o cálculo do índice de penalização. O índice de penalização médio foi calculado dividindo os valores de produtividade observados pelos valores de produtividade potenciais calculados pelo modelo. Como mencionado anteriormente o índice de penalização foi utilizado no modelo, para estimar a produtividade real das áreas de cultivo

**Tabela 2.** Pivôs de irrigação selecionados para o cálculo do índice de penalização com seus respectivos valores de produtividade, índices de penalização e diferenças entre produtividade observada e estimada pelo modelo. Valores de produtividade e diferenças entre valores observados e estimados em t ha<sup>-1</sup> na safra 2009.

Pivô	Produtividade Real Observada	Produtividade Potencial Estimada	Índice de Penalização	Produtividade Corrigida	Diferenças Observado/Estimado
1	11,700	21,010	0,557	11,556	0,144
2	10,961	19,928	0,550	10,961	0,000
3	11,412	20,572	0,555	11,315	0,097
4	11,936	21,315	0,560	11,724	0,212
5	11,036	20,885	0,528	11,487	-0,451
<b>Média</b>	11,409	20,742	0,550	11,408	0,001

Para os cinco pivôs de irrigação apresentados na Tabela 2, observa-se valores

subestimados e valores superestimados, sendo as maiores diferenças encontradas nos pivôs 4 e

ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO EM ÁREAS IRRIGADAS SOB O CULTIVO DA CULTURA DO MILHO UTILIZANDO IMAGENS DE SATÉLITE

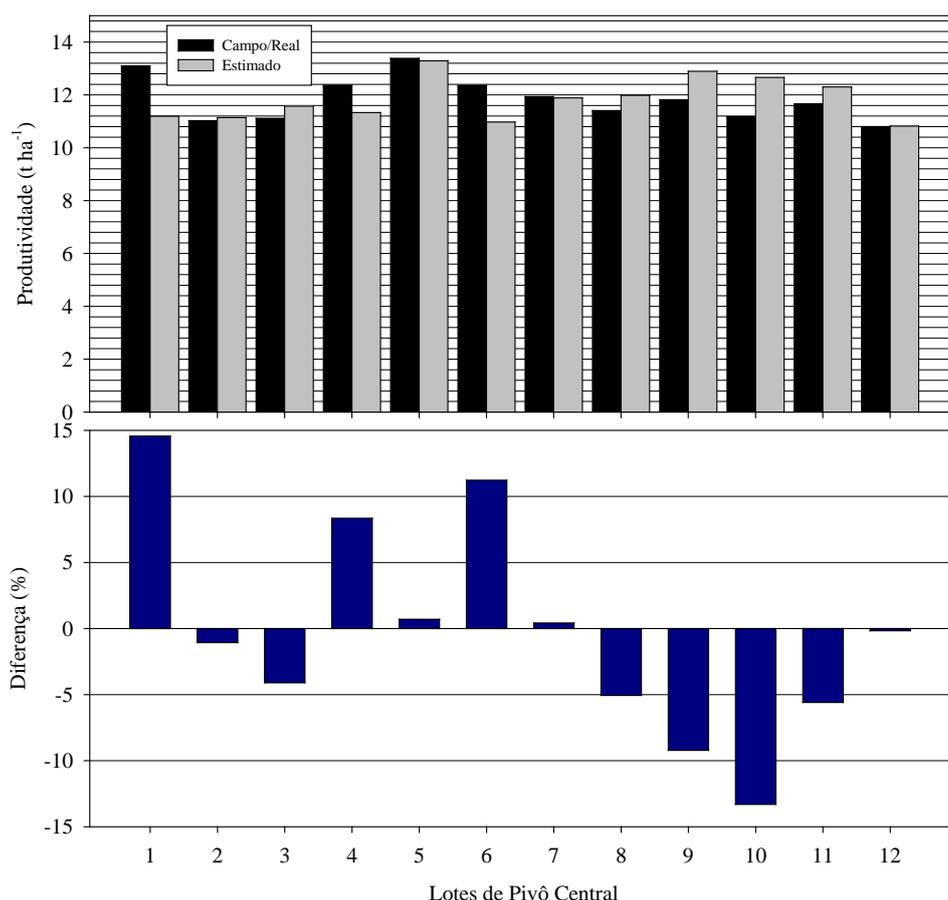
5. Quando são comparados apenas os valores médios o modelo apresenta resultado muito próximo ao real. O índice médio de penalização (0,550) foi utilizado para estimativa também da safra 2011.

Os resultados da produtividade estimada pelo modelo em comparação com os dados de produtividade observada a campo, juntamente com dados de diferença percentual para a safra de 2011 é apresentado na Figura 5.

Na safra 2009, o modelo demonstra elevado desempenho, apresentando em média

0,001 t ha<sup>-1</sup> de subestimativa. A média de produtividade observada a campo nos 5 lotes de pivô central foi 11,409 t ha<sup>-1</sup> e a média de produtividade estimada dos mesmos 5 lotes foi de 11,408 t ha<sup>-1</sup>.

A maior diferença ocorreu na estimativa do pivô de número cinco apresentando 0,451 t ha<sup>-1</sup> de diferença, superestimando o valor real em 4,47%. A menor diferença entre valores observados e estimados foi encontrada no pivô de número dois, sendo a diferença de 0,000 t ha<sup>-1</sup>.



**Figura 5.** Comparativo da produtividade observada a campo e estimada pelo modelo multiespectral na cultura do milho irrigada e diferenças percentuais entre valores estimados e observados, para 12 lotes de pivô central na safra 2011 na Fazenda Triflora.

Considerando a safra em análise 2011, o maior valor de produtividade observado foi de 13,384 t ha<sup>-1</sup>, encontrado no pivô de número 5, o valor estimado pelo modelo em questão para o mesmo lote foi de 13,289 t ha<sup>-1</sup>, sendo a diferença de 0,094 t ha<sup>-1</sup>. O menor valor de produtividade observado foi de 10,820 t ha<sup>-1</sup>, encontrado no pivô de número dois, o valor

correspondente estimado foi de 10,802 t ha<sup>-1</sup>, sendo a diferença de 0,018 t ha<sup>-1</sup>.

Diferentes métodos foram desenvolvidos para estimar o rendimento das culturas por meio de dados de sensoriamento remoto, sendo que a grande maioria dos métodos utiliza o desenvolvimento das relações empíricas entre o NDVI e a produtividade das culturas.

A desvantagem geral da maioria dos métodos que utilizam relações estatísticas entre o NDVI e a produtividade, é o forte caráter empírico, sendo que os coeficientes de correlação são taxados de moderados a baixos (GROTEN, 1993). As abordagens empíricas requerem programas excessivos de medição a campo, que em escala regional é laborioso e extremamente caro.

O modelo de produção de biomassa em questão é amplamente conhecido pelos ecologistas em escala global, no entanto este modelo é raramente testado para a estimativa da produtividade em áreas agrícolas.

Alguns trabalhos realizados com procedimentos semelhantes aos demonstrados neste trabalho, não obtiveram o mesmo sucesso que o apresentado por esta pesquisa, existem relatos que a principal causa do insucesso de outros pesquisadores seja a imprecisão na determinação dos valores observados a campo.

Dados de refletância espectral provenientes de sensoriamento remoto são os únicos com capacidade de fornecer observações consistentes em grande escala, que podem ser relacionadas a fenômenos ecológicos (ROUGHGARDEN et al., 1991), isto inclui a produtividade primária líquida (NPP), a NPP está intimamente relacionada com a atividade fotossintética das plantas (SELLERS et al., 1995). Técnicas de sensoriamento remoto que quantificam a energia luminosa absorvida surgiram como a principal fonte de informações de larga escala a respeito de NPP (produção primária líquida) (BRADFORD et al., 2005).

A adequação das estimativas obtidas por esta pesquisa pode ser explicada por fatores já conhecidos e bem estudados por vários pesquisadores, como exemplo, a relação linear existente entre o acúmulo de fitomassa e a absorção de radiação pelas plantas. Em uma planta saudável e devidamente abastecida com água e nutrientes, a fotossíntese líquida e a produção de fitomassa são proporcionais à quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel.

### CONCLUSÃO

O modelo multiespectral se mostrou eficiente para a estimativa da produção de milho em áreas irrigadas, demonstrando acurácia para prever a produtividade da cultura, tanto de forma temporal como espacial.

A elevada resolução espacial permitiu identificar uma elevada gama de detalhes, proporcionando elevado nível de precisão às estimativas. O modelo apresentou em média 0,27% (0,006 t ha<sup>-1</sup>) de subestimativa na safra 2011.

O modelo quando comparado com valores de produção observados a campo apresentou elevada proximidade entre valores estimados e observados.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; WATERS, R. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) - Advanced Training and Users Manual - Idaho Implementation**, version 1.0, 2002, 98p.
- ARAUJO, G. L. **Estimativa da produção em áreas irrigadas sob cultivo de cana-de-açúcar utilizando um modelo multiespectral**. 2013. 43 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2013.
- ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E. T.; HATFIELD, J. L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. **Agronomy Journal**, v. 76, n. 2, p. 300-306, 1984.
- BASTIAANSSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; DROOGERS, P.; de BRUIN, H. A. R.; MENENTI, M. Area-average estimates of evaporation, wetness indicators and top soil moisture during two golden days in EFEDA. **Agric. For. Meteorol.**, v. 87, p. 119–137, 1997.
- BASTIAANSSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J. F.; ROERINK, G. J.; VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for

land (SEBAL): 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 213-229, 1998b.

BASTIAANSSEN, W. G.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 94, p. 321-340, 2003.

BASTIAANSSEN, W. G.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 198-212, 1998a.

BRADFORD, J. B.; HICKE, J. A.; LAUENROTH, W. K. The relative importance of light-use efficiency modifications from environmental conditions and cultivation for estimation of large-scale net primary productivity. **Remote Sensing of Environment**, v.96, p.246-255, 2005.

BRUTSAERT, W.; SUGITA, M. Applications of self preservation in the diurnal evolution of the surface energy budget to determine daily evaporation. **Journal of Geophys. Res.**, v. 97, p. 377-382, 1992.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: Grãos – Safra 2012/2013, Nono levantamento Junho/2013** - Companhia Nacional de Abastecimento. - Brasília: Conab 2013b. 31p.

DAUGHTRY, C. S.; GOWARD, K. P.; PRINCE, S. D.; KUSTAS, W. P. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. **Remote Sensing of the Environment**, v. 39, p. 141-152, 1992.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Cultivo do Milho**. [http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho\\_8ed/economia.htm](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho_8ed/economia.htm). Acesso em 22/11/2013.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Cultivo do Milho**. [http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho\\_4ed/manejo\\_milho.htm](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho_4ed/manejo_milho.htm). Acesso em 22/11/2013.

FIELD, C. B.; RANDERSON, J. T.; MALMSTROM, C. M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, p. 74-88, 1995.

JALOTA, S. K.; SOOD, A. G. B. S.; CHAHAL, B. U. Crop water productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) – wheat (*Triticum aestivum* L.) system as influenced by deficit irrigation, soil texture and precipitation. **Agricultural Water Management**, v.84, p.137-146, 2006.

LÓPEZ-MATA, E.; TARJUELLO, J. M.; JUAN, J. A. DE; BALLESTEROS, R.; DOMÍNGUEZ, A. Effect of irrigation uniformity on the profitability of crops. **Agricultural Water Management**, v.98, p.190-198, 2010.

MOLDEN, D. J.; SAKTHIVADIVEL, R. Water accounting to assess use and productivity of water. **International Journal of Water Resources Development**, v.1, p.55-71, 1999.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, v. 9, p. 747-766, 1972.

NEHER, C. **Brasil se torna maior exportador mundial de milho, mas deve perder posto**. <http://dw.de/p/18p0o>. Acesso em 22/11/2013.

SAMARASINGHE, G. B. Growth and yields of Sri Lanka's major crops interpreted from public domain satellites. **Agricultural Water Management**, v.58, p.145-157, 2003.

SHUTTLEWORTH, W. J.; GURNEY, R. J.; HSU, A. Y.; ORMSBY, J. P. **FIFE: the variation in energy partition at surface flux**

sites. IAHS Publ. No. 186, 1989.

MORAN, M. S.; INOUE, Y.; BARNES, E. M. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. **Remote Sensing of Environment**, v.61, p.319-346, 1997.

DAUGHTRY, C. S. T.; WALTHALL, C. L.; KIM, M. S.; BROWN de COLSTOUN, E.; MCMURTREY III, J. E. Estimating corn leaf chlorofila concentration from leaf and canopy reflectance. **Remote Sensing Environment**, v.74, p.229-239, 2000.

GROTEN, S. M. E. NDVI - crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso. **International Journal of Remote Sensing**, v.14, p.1495-1515, 1993.

ROUGHGARDEN, J.; RUNNING, S. W.; MATSON, P. A. What does remote sensing do for ecology? **Ecology**, v.72, p.1918-1922, 1991.

SELLERS, P. J.; MEESON, B. W.; HALL, F. G.; ASRAR, G.; MURPHY, R. E.; SCHIFFER, R. A. Remote sensing of the land surface for studies of global change: Models - algorithms - experiments. **Remote Sensing of Environment**, v.51, p.3-26, 1995.

BRADFORD, J. B.; HICKE, J. A.; LAUENROTH, W. K. The relative importance of light-use efficiency modifications from environmental conditions and cultivation for estimation of large-scale net primary productivity. **Remote Sensing of Environment**, v.96, p.246-255, 2005.