

FÁBIO CELSO DE OLIVEIRA

**ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA PARA AS
BACIAS DOS RIOS DOCE, SÃO MATEUS E JEQUITINHONHA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2010**

FÁBIO CELSO DE OLIVEIRA

**ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA PARA AS
BACIAS DOS RIOS DOCE, SÃO MATEUS E JEQUITINHONHA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 30 de julho de 2010.

Pesq. Mariano Pereira Silva

Prof. Paulo José Hamakawa

Prof. Sérgio Zolnier
(Coorientador)

Prof. Antonio José Steidle Neto
(Coorientador)

Prof. Aristides Ribeiro
(Orientador)

À minha esposa: Carla Fernandes de Oliveira

À minha filha: Lara Fernandes Oliveira

DEDICO

Aos meus pais:

Antônio Alberto de Oliveira

Margarida Leocádio de Oliveira

OFEREÇO

AGRADEÇIMENTOS

Ao Deus da minha vida, por ser a fonte de força e coragem nos momentos mais difíceis.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade oferecida e aos professores do Departamento de Meteorologia Agrícola pela amizade e ensinamentos ministrados.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro.

Ao professor Aristides Ribeiro, pela orientação e amizade.

Ao amigo Antonio Steidle, pela ajuda no desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas, pela ajuda nos momentos de dúvidas.

Aos meus irmãos, que sempre estiveram presentes mesmo distantes.

A todos que, direta e indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

FÁBIO CELSO DE OLIVEIRA, filho de Antônio Alberto de Oliveira e Margarida Leocádio de Oliveira, nasceu em 28 de julho de 1980, em Viçosa, estado de Minas Gerais. Em dezembro de 2003, concluiu o curso de graduação em Física na Universidade Federal de Viçosa. Em agosto de 2008, ingressou no curso de Mestrado em Meteorologia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de dissertação em julho de 2010.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO DE LITERATURA	03
2.1. DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA	03
2.2. IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL	04
2.2.1. RADIAÇÃO SOLAR DIRETA	05
2.2.2. RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA	06
2.3. RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA	06
2.4. A RFA E A FOTOSSÍNTESE	07
2.5. FATORES DE CONVERSÃO DA RFA	09
2.6. MEDIDA DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA	09
2.7. ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA	10
2.8. TRANSMITÂNCIA ATMOSFÉRICA	10
2.9. INSTRUMENTOS DE MEDIDAS DA RADIAÇÃO SOLAR	11
2.9.1. PIRANÔMETROS	11
2.9.1.1. TIPOS DE PIRANÔMETROS	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1. CARACTERIZAÇÃO DAS LOCALIDADES ESTUDADAS	14
3.2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS METEOROLÓGICOS	16
3.3. DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE MODELOS	18
3.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1. VARIABILIDADE DA RADIAÇÃO GLOBAL.....	22
4.2. VARIABILIDADE DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA....	24
4.3. VARIABILIDADE DA RELAÇÃO RFA/Rg.....	27
4.4. INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL NA RELAÇÃO RFA/Rg....	36
4.5. MODELAGEM DA RELAÇÃO RFA/Rg.....	44
4.6. VALIDAÇÃO DOS MODELOS DA RELAÇÃO RFA/Rg.....	46
4.6.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	51
5. CONCLUSÕES	55
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

7. ANEXOS	62
------------------------	-----------

RESUMO

OLIVEIRA, Fábio Celso de, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, Julho de 2010. **Estimativa da radiação fotossinteticamente ativa para as bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha**. Orientador: Aristides Ribeiro. Coorientadores: Antonio José Steidle Neto e Sérgio Zolnier.

A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) é uma fração da radiação solar global (R_g) de grande interesse para diferentes áreas relacionadas à fisiologia vegetal e às ciências agrárias, pois está diretamente associada à produção de biomassa, à morfologia vegetal e ao crescimento de plantas; sendo também essencial em estudos ecológicos e no cálculo da área foliar do dossel vegetativo de culturas. Apesar da sua importância, a RFA não é uma variável frequentemente medida nas estações meteorológicas convencionais e automáticas. Para superar a falta de dados desta variável climática, vários pesquisadores propuseram modelos capazes de estimar a RFA com base na sua relação com a R_g . Neste trabalho, foi realizada a modelagem da RFA em função da R_g , a partir de dados medidos durante os anos de 2005 e 2006, em regiões das bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha, pertencentes aos estados de Minas Gerais, Bahia e Espírito Santo, respectivamente, considerando-se as variabilidades sazonal (períodos chuvosos e secos), interanual e espacial. Adicionalmente, os modelos de estimativa gerados foram validados utilizando-se séries históricas referentes ao ano de 2007 para cada localidade estudada. Os dados utilizados nesta pesquisa foram obtidos em 18 estações meteorológicas automáticas pertencentes às empresas florestais CENIBRA e FIBRIA durante o período de 01 de janeiro de 2005 a 31 de dezembro de 2007. Na caracterização dos períodos chuvosos, considerou-se os quatro meses (novembro, dezembro, janeiro e fevereiro) ao longo do ano com os maiores valores acumulados de precipitação pluvial enquanto que no período seco foram utilizados os quatro meses (maio, junho, julho e agosto) de precipitação pluvial menos elevada. A avaliação dos desvios dos valores de RFA estimados em relação aos medidos foi efetuada por meio de erros estatísticos (média dos erros de estimativa, erro padrão de estimativa, raiz quadrada da média dos erros ao quadrado, índice de concordância de Wilmott). Com o auxílio do programa computacional *ArcMap* foram feitas espacializações dos resultados. Os coeficientes de determinação

mínimo (93%) e máximo (99%) demonstraram que os valores da RFA estão bem correlacionados com valores da Rg. Em termos percentuais, a relação RFA/Rg no período anual variou de 45% a 48% com média de 46%, e de 43% a 50% com média de 47% para as estações meteorológicas das empresas CENIBRA e FIBRIA, respectivamente. Os resultados obtidos pelos modelos com partição sazonal foram ligeiramente melhores do que os modelos de partição anual. A relação RFA/Rg variou com a precipitação ao longo dos anos e, de maneira geral, constatou-se que as relações apresentaram tendências de serem superiores nos períodos chuvosos comparativamente aos períodos secos. Com base na variabilidade espacial, concluiu-se que os valores determinados neste estudo têm aplicabilidade somente para as localidades estudadas.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Fábio Celso de, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2010. **Estimation of the photosynthetically active radiation for the Doce, São Mateus and Jequitinhonha river basins.** Advisor: Aristides Ribeiro. Co-advisors: Antonio José Steidle Neto and Sérgio Zolnier.

Photosynthetically active radiation (PAR) is a fraction of the global solar radiation (R_g) of great interest for different fields related to vegetal physiology and agrarian sciences since it is directly associated to the production of biomass, vegetal morphology and plant growth. It is also essential in ecological studies and in the calculation of the canopy leaf area in vegetative species. Despite its importance, the PAR is not a frequently measured variable at conventional and automatic meteorological stations. To overcome the lack of data for this climatic variable, various studies propose models capable of estimating PAR based on its relation with R_g . In this study, PAR was modeled in function of R_g , using data measured during the years of 2005 and 2006 in regions of the Doce, São Mateus and Jequitinhonha river basins, located in the Brazilian states of Minas Geras, Bahia, and Espírito Santo, respectively, considering the seasonal (rainy and dry periods), temporal and spatial variabilities. Additionally, the generated predictive models were validated using a historical series referring to the year of 2007 for each location studied. The data utilized in this study were obtained at 18 automatic meteorological stations belonging to the forestry companies CENIBRA and FIBRIA during the period of January 1, 2005 to December 31, 2007. Characterization of the rainy period considered the four months (November, December, January and February) of the year as those with greatest rainfall, while the dry period consisted of the four months (May, June, July and August) of minimal rainfall. Evaluation of deviations of the estimated PAR values in relation to those measured was performed by means of statistical errors (average error of estimation, root mean square of the squared errors, Willmott concordance index). With the aid of the ArcMap computational program, spatialization of the results was performed. The minimum (93%) and maximum (99%) coefficients of determination demonstrated that the PAR values correlate well with the R_g . In terms of percentages, the PAR/ R_g ratio over the year varied from 45% to 48% with an average of 46%, and from 43% to 50% with an average of 47% for the meteorological stations of the

companies CENIBRA and FIBRIA, respectively. The results obtained by the models with seasonal partitioning were slightly better than those of the annual partitioned models. The PAR/Rg ratio varied with precipitation along the years and, in general it was found that the relations presented tendencies to be greater in the rainy periods in comparison with the dry periods. Based on spatial variability, it was concluded that the values determined in this study have applicability only for the locations studied.

1. INTRODUÇÃO

A radiação solar é o fluxo de energia proveniente do Sol, que emite em uma densidade de fluxo de cerca de $6,33 \times 10^7 \text{ W m}^{-2}$, na forma de ondas eletromagnéticas. Ao incidir no topo da atmosfera, a radiação solar se propaga até atingir a superfície terrestre, passando durante este percurso pelos processos de reflexão, absorção e espalhamento, que não são suficientes para reter todo o espectro da radiação solar. A parcela da radiação solar que atinge a superfície terrestre, que aparentemente não sofre interação com a atmosfera, é denominada de irradiação solar direta, enquanto a que atinge a superfície após sofrer o processo de espalhamento é denominada de irradiação solar difusa (GOMES, 2006). A somatória das irradiações direta e difusa é denominada de irradiação solar global (Rg).

A fração da irradiação solar global, compreendida na faixa espectral do visível (0,4 a 0,7 μm) e denominada de radiação fotossinteticamente ativa (RFA), apresenta grande importância em estudos sobre a produção de biomassa, morfologia vegetal, crescimento de plantas, taxa fotossintética e condutância estomatal por ser a radiação capaz de excitar as moléculas de clorofila, iniciando o processo químico que ocorre nos cloroplastos, o que resulta na liberação de oxigênio molecular e na captura de dióxido de carbono da atmosfera (CARTER & KLINKA, 1992; ACKERLY & BAZZAZ, 1995).

Apesar da sua importância, a RFA não é uma variável frequentemente medida nas estações meteorológicas convencionais e automáticas (STEIDLE NETO et al., 2006). De acordo com FRISINA (2002), medições de RFA podem ser realizadas diretamente por meio de sensores quânticos que medem a radiação solar na faixa espectral do visível ou por espectroradiômetros que medem as distintas faixas espectrais da Rg.

FRISINA (2000) menciona o custo dos sensores e a necessidade periódica de manutenção dos instrumentos (limpeza, calibração e aferição) como os principais fatores que dificultam o estabelecimento de bancos de dados de radiação fotossinteticamente ativa, pois a maioria dos detectores da RFA utilizados no Brasil é de natureza quântica, sendo estes sensores sujeitos à degradação quando expostos constantemente à radiação solar, o que acaba inviabilizando sua utilização por períodos de tempo prolongados.

Muitos trabalhos científicos, consideram-se que a RFA corresponde a uma fração constante da R_g igual a 50% (OLIVEIRA et al., 2007; SPOLADOR et al., 2006; HEINEMANN et al., 2005). Contudo, vários trabalhos (ASSIS & MENDES, 1989; SZEICZ, 1974; BRITTON & DODD, 1976; MARTIN et al., 2008; STEIDLE NETO et al., 2006) têm demonstrado que esta relação além de não ser exata é bastante variável no tempo e no espaço. Diversos trabalhos mostram que esta fração varia em função de diferentes fatores como elevação solar (WEISS & NORMAN, 1985), turbidez atmosférica, teor de água precipitável (BRITTON et al., 1976), pressão atmosférica, estações seca e chuvosa (STEIDLE NETO et al., 2006) e nebulosidade (ALADOS, 1994).

Para superar a ausência de dados de RFA, vários pesquisadores propuseram modelos capazes de estimar a RFA com base na sua relação com a R_g , que é mais frequentemente medida nas estações meteorológicas automáticas (FRANÇA et al., 1997; MÖTTUS et al., 2001). Conforme já mencionado, outras variáveis atmosféricas podem afetar esta relação, porém modelos de estimativa de RFA que envolvem muitas variáveis meteorológicas são complexos e, em razão disso, são de pouca adoção (STEIDLE NETO et al., 2006).

Pesquisas científicas que proponham modelos capazes de estimar a RFA não foram amplamente realizadas para regiões das bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha. Os resultados podem ser de utilidade para pesquisadores, empresas florestais e produtores agrícolas de grande porte na otimização dos sistemas de cultivo de espécies vegetais, como variável de entrada em modelos de crescimentos de plantas, dentre outras aplicações.

Diante do exposto, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de caracterizar a variação da irradiação solar global, radiação fotossinteticamente ativa e a relação RFA/ R_g durante os anos de 2005 a 2007. Com base nos dados referentes aos anos de 2005 e 2006, desenvolver modelos de estimativa da RFA em função da irradiação solar global para diferentes regiões da bacia dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha, considerando as variabilidades sazonal (períodos secos e chuvosos), interanual e espacial. Utilizando os dados referentes ao ano de 2007, validar os modelos de estimativa da relação entre a radiação solar global e a radiação fotossinteticamente ativa.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

Segundo Varejão-Silva (2005), a denominação de radiação, ou energia radiante, se vincula à energia que se propaga sem necessidade da presença de um meio material, também aplicada para designar o próprio processo de transferência desse tipo de energia. A energia radiante ora revela uma natureza corpuscular (fóton), ora se comporta como uma onda eletromagnética, acontecendo, na escala subatômica, de as propriedades ondulatória e corpuscular coexistirem e se complementarem.

Sob o ponto de vista ondulatório, a radiação se caracteriza pelo comprimento de onda (λ), ou pela frequência de oscilação (f). O produto do comprimento de onda (distância entre duas cristas consecutivas) pela frequência da radiação (número de cristas que passa por um ponto de referência) é igual à velocidade de propagação da luz no vácuo (c), segundo a expressão:

$$C = \lambda.f \quad (1)$$

sendo $c = 2,997925 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ (Yavorsky e Detlaf, 1972). As unidades mais usadas para comprimento de onda são o micrometro (μm) = 10^{-6} m e o *Angstrom* (Å) = 10^{-10} m .

Praticamente toda a troca de energia entre a Terra e o resto do Universo ocorre por radiação. O sistema Terra-atmosfera está constantemente absorvendo radiação solar e emitindo sua própria para o espaço, sendo as taxas de absorção e emissão aproximadamente iguais (LUTGENS, TARBUCK, 1989). A radiação eletromagnética, considerada como um conjunto de ondas elétricas e magnéticas, também tem papel importante na transferência de calor entre a superfície da Terra e a atmosfera, e entre diferentes camadas da atmosfera. As diversas formas de radiação, caracterizadas pelo comprimento de onda, compõem o espectro eletromagnético (Fig. 1).

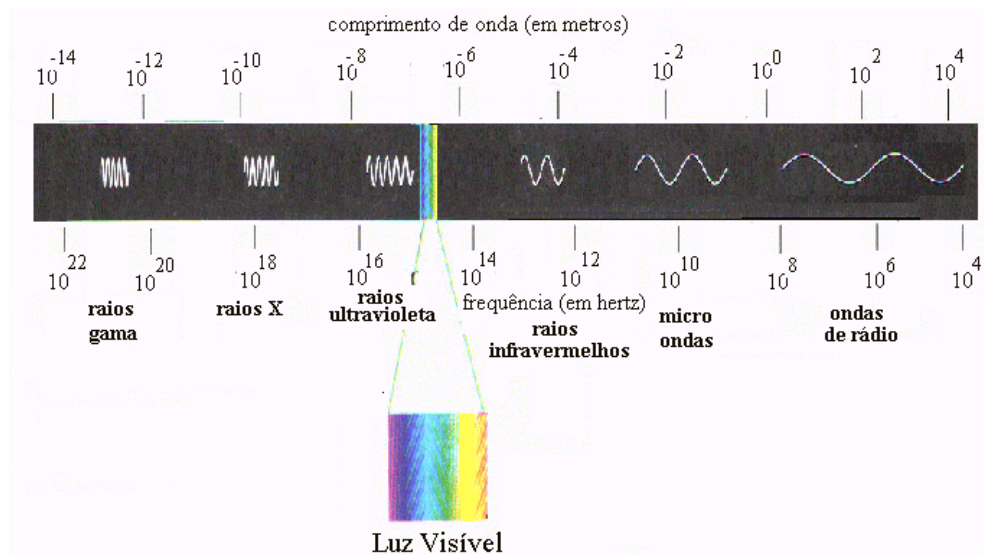


Figura 1 - Espectro Eletromagnético das radiações conhecidas, organizadas de acordo com o comprimento de onda.

Fonte: GRIMM, 1999.

A energia radiante do sol, concentrada na parte visível do espectro ou próxima, se distribui, em relação ao total, com 43% de luz visível, 49% de infravermelho próximo e 7% de ultravioleta. Quando tal energia é absorvida por um corpo, resulta num aumento do seu movimento molecular e de sua temperatura (LUTGENS, TARBUCK, 1989).

Segundo o modelo corpuscular, a radiação também é uma partícula, a qual denominamos fóton. Cada fóton contém uma quantidade de energia que é chamada de “quantum”. O conteúdo de energia da luz não é contínuo, mas emitido em pequenos “pacotes” os quanta. A energia de um fóton depende da freqüência de vibração descrita pela lei de Planck.

$$E = h.f \quad (2)$$

Onde **h** é constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ Js) e **f** a freqüência do oscilador.

2.2. IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

O fluxo de energia proveniente do Sol, conhecido como radiação solar, influencia a temperatura do ar, a pressão barométrica, a velocidade do ar, a precipitação pluvial e a umidade relativa do ar, além de ser a fonte primária de

energia para os principais processos terrestres, desde a fotossíntese até a circulação geral da atmosfera e dos oceanos.

Ao atravessar a atmosfera terrestre, a irradiação solar é parcialmente absorvida pelo dióxido de carbono, ozônio e vapor de água. A outra parte é refletida pelas nuvens, sendo espalhada seletivamente pelas moléculas dos gases constituintes de mesmas dimensões do comprimento de onda da radiação e espalhada não seletivamente por partículas em suspensão (aerossóis) que difundem em todas as direções (VIANELLO & ALVES, 1991). Como resultado destes processos físicos, a irradiação solar é atenuada durante a sua trajetória. Estudos mostram que esta atenuação não é a mesma para todos os comprimentos de onda do espectro solar (IQBAL, 1983).

A parcela da energia solar incidente no topo da atmosfera que atinge diretamente a superfície do solo é chamada de radiação solar direta. Por outro lado, a parcela espalhada em várias direções pelo processo de difusão atmosférica é denominada de radiação solar difusa (VIANELLO & ALVES, 1991). A somatória das radiações direta e difusa é denominada de radiação solar global (R_g).

2.2.1. RADIAÇÃO SOLAR DIRETA

Pode-se dizer que a distribuição espectral da radiação solar incidente, na camada superior da atmosfera, é comparável àquela emitida por um corpo negro a aproximadamente 6000K. A diferença verificada entre as curvas, na região do ultravioleta, tem como causa principal as transições eletrônicas ocorridas na camada de gases do Sol. Na travessia da radiação pela atmosfera, vários processos, que mudam sua distribuição espectral, são observados. As mais importantes absorções são devidas ao vapor d'água, no infravermelho, e ao ozônio, no ultravioleta. O espalhamento da radiação, notadamente nas ondas curtas, é responsável pelo decréscimo nas regiões do visível e o UV próximo.

Porém, grande parte da radiação solar é transmitida diretamente e alcança a superfície terrestre em feixes aproximadamente paralelos, como se comprova olhando diretamente para o Sol, sendo este processo regido pela lei de Bouguer-Lambert. Portanto, a radiação direta é aquela que se recebe na superfície terrestre sem ter sofrido nenhum dos processos antes mencionado ao passar pela atmosfera.

Mede-se a radiação solar direta por meio de instrumentos denominados de Pireliômetros, cujas superfícies receptoras são dispostas normalmente aos raios solares incidentes.

2.2.2. RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA

A energia constituinte da radiação difusa do céu é o resultado do espalhamento dos raios solares incidentes em algum tipo de partícula, suspensa na atmosfera. Dos dois tipos de espalhamentos mais gerais, um deles é aquele produzido por partículas de tamanho muito pequeno, comparado ao comprimento de onda (Rayleigh) e o outro, aquele produzido por partículas de tamanho comparável ou maior que o comprimento de onda (Mie).

As moléculas gasosas do ar, principalmente oxigênio e nitrogênio, são os maiores espalhadores de Rayleigh e dominam a forma de espalhamento nos casos de atmosferas claras e livres de turbidância. Para as atmosferas túrbidas, as partículas de aerossóis espalham fortemente e o espalhamento de Mie chega ser tão importante quanto o de Rayleigh em comprimentos de onda no azul e no UV. No visível longínquo e infra-vermelho, o processo de espalhamento em atmosferas túrbidas está dominado pelo espalhamento de Mie e para as atmosferas fortemente contaminadas ou nubladas, o espalhamento de Mie é o dominante em todos os comprimentos de ondas. Diz-se que radiação difusa é a radiação solar recebida do Sol após sua direção ter sido alterada devido à dispersão pela atmosfera, ou, ainda, que a radiação difusa é a que se recebe depois de ter mudado sua direção pelos processos de refração e reflexão que ocorrem na atmosfera.

2.3. RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA

De maneira simplificada, a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) é considerada a densidade de fluxo de energia compreendida na faixa espectral do visível. Segundo ALADOS & ALADOS-ARBOLEDAS (1999), a RFA pode ser expressa tanto em termos de energia como de fluxo de fótons fotossintéticos nos limites de 0,40 a 0,70 μm , porém outras faixas de comprimento de onda da RFA também são encontradas na literatura, devido principalmente às características peculiares dos diferentes métodos de medida adotados, como entre 0,39 a

0,71 μm (GAASTRA, 1959) e 0,40 a 0,63 μm (HOWELL & MEEK, 1983; KARALIS, 1983).

Em termos de energia, a RFA pode ser representada por irradiação, ou seja, densidade de fluxo de energia radiante fotossinteticamente ativa que incide em uma superfície. Dependendo da partição adotada, as unidades de fluxo de energia da RFA são dadas em W m^{-2} para valores instantâneos e, MJ m^{-2} para valores diários. As unidades de fluxo de fótons fotossintéticos da RFA são expressos em $\mu\text{E m}^{-2}$ para valores horários e, E m^{-2} para valores diários (ALADOS & ALADOS-ARBOLEDAS, 1999).

A radiação fotossinteticamente ativa atravessa a atmosfera praticamente sem sofrer redução por absorção, sendo esta a maior componente da radiação solar global incidente, podendo chegar a, aproximadamente, 50% de todo o espectro (PEREIRA et al., 2002).

2.4. A RFA E A FOTOSSÍNTESE

A vida na terra depende da energia derivada do sol. A fotossíntese é o único processo de importância biológica que pode colher esta energia. O termo fotossíntese significa literalmente “síntese com o uso da luz”, sendo então, este processo, capaz de transformar a energia luminosa, em energia elétrica e convertê-la, através da fixação do carbono, em energia química resultando com isto a síntese de compostos de carbono, que apresentam funções como fonte energética para a célula, osmorregulador, sinalizador de processos de fisiológicos, transforma-se em açúcar de reserva ou ainda constituinte de parede celular que é de fato o carbono fixado (TAIZ; ZEIGER, 2004). A fotossíntese é a via pela qual praticamente quase toda energia entra na Biosfera, sendo o processo mais importante que ocorre na Terra. Durante a fotossíntese as plantas, algas, bactérias fotossintetizantes são capazes de utilizar a luz para converter moléculas simples (CO_2 e H_2O) em moléculas orgânicas complexas que são utilizadas igualmente por plantas e animais como fontes de energia e moléculas estruturais. Além disso, a fotossíntese libera O_2 para atmosfera, sendo importante para a respiração celular e na síntese de ATP (RAVEN *et al.*, 1999).

No processo biológico, o espectro radiante do sol é praticamente dividido em três faixas distintas de comprimento de onda, representadas por radiação ultravioleta, de 0,3 a 0,4 μm , pela banda visível, ou radiação fotossinteticamente

ativa, de 0,4 a 0,7 mm, e pelo infravermelho próximo, de 0,7 a 2,8 mm (MONTEITH & UNSWORTH, 1990). Neste comprimento de onda, a forma de absorção das clorofilas e carotenóides presentes nos cloroplastos é a mesma, somente alterando a intensidade e velocidade da reação (RAVEN et al. 1999). A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) é a faixa espectral que mais ativa as moléculas de clorofila das plantas, já que a radiação ultravioleta também contribui com a ocorrência do processo de fotossíntese, só que de forma pouco significativa (McCREE, 1971-72). O conhecimento da PAR é importante para diferentes áreas relacionadas à fisiologia vegetal e ciências agrárias, pois está diretamente associada a produção de biomassa e taxa de crescimento das plantas, sendo também um importante parâmetro para estudos ecológicos, onde a radiação solar é tomada como sendo uma variável independente (BROCK, 1981).

A produtividade biológica de uma vegetação é determinada por sua habilidade em capturar e transformar a irradiação solar, constituindo um espectro de interação com a irradiação incidente. Mas segundo MOTA (1985) existe uma grande variação de rendimento fotossintético, dependendo não só das características óticas das folhas (refletância, transmitância), como fatores agrônômicos (condições de cultura, idade, arquitetura foliar, geometria foliar) e de condições do meio ambiente (temperatura, umidade e vento).

Vários trabalhos destacam a eficiência da RFA pelas plantas. HALL & RAO (1978) citam que somente uma pequena porcentagem do total de energia luminosa recebida é convertida em energia química, que é armazenada como produto fotossintético e novo material vegetativo.

GASTRA (1962) citado por MOTA (1985) comparou em um ensaio com beterraba açucareira a variação estacional de produção de matéria seca em função do potencial fotossintético, verificando que a eficiência de conversão de energia ocorreu no meio da estação, quando a planta estava crescendo ativamente, chegando a uma conversão de 6,1% para a luz visível e 2,5% para o total incidente.

WAHTLEY & WAHTLEY (1980) citam, que para uma pastagem bem cuidada a conversão da radiação fotossintética chega a apenas a 2% da incidente, devido ao alto índice de albedo (radiação refletida) e de conversão em energia térmica e para a cana-de-açúcar a conversão pode apresentar um índice de 7%.

2.5. FATORES DE CONVERSÃO DA RFA

Para a representação de unidades fisiológicas, a densidade de fluxo de fótons fotossintético é dada como $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$, quanta $\text{mol}^{-1}\text{s}^{-1}$ ou $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, baseada na faixa de 0,4 a 0,7 μm incidente por unidade de tempo em uma unidade de superfície (ALADOS-ARBOLEDAS et al., 2000).

McCREE (1972) obteve a razão de fluxo de fótons fotossintéticos pelo fluxo de energia da RFA para dias de céu nublado em torno de $4,24 \mu\text{mol J}^{-1}$ e para dias de céu claro em torno de $4,57 \mu\text{mol J}^{-1}$, sugerindo estes como fatores de conversão de $\mu\text{E J}^{-1}$ para W m^{-2} . BAKER & FOUIN (1987) encontraram valores de aproximadamente $4,38 \mu\text{E J}^{-1}$ para a conversão entre o fluxo de fótons e o fluxo de energia.

Visando a padronização, HOWELL & MEEK (1983) sugeriram que as irradiações de ondas curtas, RFA e medições de fluxo de fótons fotossintéticos devem ser feitas simultaneamente, evitando as diferenças entre as componentes, encontrando o valor de $4,7 \mu\text{mol J}^{-1}$ para conversão.

2.6. MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA

Diversas pesquisas científicas foram realizadas com a finalidade de se obter uma melhor definição para os limites de comprimento de onda que compreendem a RFA. Os dois principais métodos de obtenção da RFA são classificados como direto e indireto.

No método direto, a radiação solar global é medida por meio de um piranômetro de termopilhas e a RFA é medida por um sensor quântico (ALADOS-ARBOLEDAS et al., 2000). Por outro lado, no método indireto, descrito por PAPAIOANNOU et al. (1993), a RFA pode ser definida como a diferença entre duas medidas de irradiância correspondentes, geralmente entre o comprimento de onda de 0,3 a 2,7 μm e 0,7 a 2,7 μm , sendo necessário a utilização de três instrumentos, um piranômetro para a radiação solar global, um piranômetro específico para a faixa do infravermelho e um medidor de radiação ultravioleta.

ROSS & SULEV (2000) apontam para o fato da não padronização da faixa espectral da RFA ser uma das principais fontes de erros nas medições desta fração da radiação solar global, além do limite médio de sensibilidade dos dois piranômetros mais amplamente empregados (Eppley PSP e Kipp & Zonen), que

também pode afetar seriamente os resultados. Sendo assim, o método indireto nem sempre permite que se obtenha exatamente os limites de comprimento de onda da RFA entre 0,4 a 0,7 μm , sendo geralmente menos preciso do que as medidas diretas.

2.7. ESTIMAÇÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA

Em vários trabalhos científicos, a RFA foi estimada por meio da R_g medida rotineiramente em estações meteorológicas automáticas (ASSIS & MENDES, 1989; BRITTON & DODD, 1976; MARTIN et al., 2008). Uma das maneiras utilizadas para estimar a RFA é através do cálculo do fluxo de densidade de fótons relativa, ou seja, da razão RFA/ R_g proposta inicialmente por McCREE (1972). Algumas pesquisas evidenciaram a necessidade de calibrações locais da relação RFA/ R_g , devido à diferenças climáticas existentes entre distintas localidades.

MOON (1940) foi um dos primeiros pesquisadores a apresentar a RFA como 44% da radiação global incidente dentro da faixa espectral de 0,4 a 0,7 μm .

A relação entre os fluxos de radiação fotossinteticamente ativa (E m^{-2}) e de radiação solar global (MJ m^{-2}) foi determinada por ASSIS & MENDES (1989) para Rio Grande do Sul, onde a RFA pôde ser estimada em 2,23 vezes a R_g ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$), com razão RFA/ R_g de 47%.

SZEICZ (1974) registrou na Inglaterra para dias claros e secos, a razão RFA/ R_g igual a 50% no verão e 46% no inverno. Já BRITTON & DODD (1976), encontraram um valor médio de 48% durante o verão e 46% no inverno dos Estados Unidos.

Analisando a sazonalidade da relação RFA/ R_g em localidades do estado de Minas Gerais, STEIDLE NETO et al. (2006) obtiveram valores variando entre 48 a 51% para períodos secos e de 47 a 49% para períodos chuvosos.

2.8. TRANSMITÂNCIA ATMOSFÉRICA

Na presença de nebulosidade, o fluxo de energia radiante pode aumentar ou diminuir. Se a nebulosidade é parcial e o Sol não está totalmente encoberto, a radiação solar global pode ser maior do que aquela de um dia de céu claro. Em

condições de nebulosidade intensa, a radiação solar global é sempre menor do que aquela de um dia de céu sem nuvens (DUFFIE et al., 1980).

De VAULT & KTSAROS (1983) citam que as nuvens atenuam a R_g em comprimentos de onda maiores que $0,7 \mu\text{m}$ por processos de absorção e espalhamento, atuando como verdadeiros filtros, ao passo que a atenuação pelas nuvens, na faixa do visível, deve-se somente ao espalhamento.

FEITOSA et al. (1998) estudaram a radiação solar global em áreas de floresta e de pastagem na Amazônia durante as estações seca e chuvosa. Esta pesquisa evidenciou uma diferença de $1,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ maior para a área de floresta em relação à pastagem no período seco, devido à maior presença de aerossóis na atmosfera (fuligem) provenientes de queimadas nas pastagens.

2.9. INSTRUMENTOS DE MEDIDAS DA RADIAÇÃO SOLAR

2.9.1. PIRANÔMETROS

A radiação direta somada com a radiação difusa dão como resultado o valor da radiação global. Logo, se pode obter valores de radiação direta a partir de valores medidos de radiação global e de radiação difusa, ou através de instrumento que forneça valores medidos de radiação direta normal. Tais instrumentos são denominados Piranômetros, existindo os que são considerados padrão (primário e secundário) e os de primeira e segunda classes. São instrumentos de alta precisão (de $\pm 0,1\%$ a $\pm 2,0\%$).

Usa-se, habitualmente, piranômetros cujo elemento de captação da radiação, o sensor, é uma termopilha, que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, normalmente pintadas de preto e branco, e igualmente iluminadas. A vantagem principal de tal sensor é a sua resposta uniforme em relação ao comprimento de onda (Atlas Solarimétrico do Brasil, 2000).

São também muito usados, para medições piranométricas, instrumentos com sensores de fotocélulas de silício monocromático. Seus custos são de 10 a 20% dos custos dos instrumentos que usam termopilhas. A maior limitação é a não uniformidade da resposta espectral e a região relativamente limitada de comprimento de onda ($0,40 \mu\text{m}$ a $1,1 \mu\text{m}$ com máximo em torno dos $0,90 \mu\text{m}$), a qual a fotocélula é sensível (Atlas Solarimétrico do Brasil, 2000).

2.9.1.1. TIPOS DE PIRANÔMETROS

a) Piranômetro Fotovoltaico

Trabalhos, com grande consistência científica, de Michalsky, Harrison, Lebaron (1987) apostam que este tipo de instrumento (de primeira e segunda classe) apresenta boas condições de utilização, tanto pelo desempenho apresentado, como pelo baixo custo. O seu elemento sensor é uma célula fotoelétrica, normalmente de silício monocristalino, que tem a propriedade de produzir uma corrente elétrica quando iluminada, sendo que quando atinge o curto-circuito, esta corrente é proporcional à intensidade da radiação incidente. Seu uso é recomendado para integrais diárias de radiação solar global sobre um plano horizontal ou para verificar pequenas flutuações da radiação, em função de sua grande sensibilidade e resposta quase instantânea, cerca de 10s. Avalia-se que, para valores diários, pode apresentar um erro de mais ou menos 3%, porém com alguns procedimentos de correção, pode-se conseguir erros menores do que 1% (Atlas Solarimétrico do Brasil, 2000).

Os sensores fotoelétricos têm sua eficiência afetada, basicamente, como é exposto por Araújo (1985), por dois fatores: seletividade de absorção da célula e procedimentos de fabricação. A seletividade desses sensores faz com que nem todos os fótons que incidem no material semicondutor sejam aproveitados para gerarem pares elétrons-lacunas. Alguns fótons que incidem no material semicondutor possuem energia menor que a do *gap* (lacunas) do material, não gerando pares elétrons-lacunas. Outros possuem energia muito maior e podem passar pelo material sem serem absorvidos. Devido a estes fatos, os sensores fotoelétricos constituídos por silício somente são sensíveis a radiações com comprimentos de onda correspondentes a luz visível e ao infravermelho perto do visível.

A não coincidência dos máximos de energia para cada comprimento de onda do espectro solar e o da resposta espectral do sensor fotoelétrico faz com que nem toda a energia solar seja captada pelo sensor.

Um outro fator que contribui para o aumento da incerteza da medida de radiação solar é a sensibilidade do sensor. Sua absorção de radiação varia com ângulo de incidência e para sensores fotoelétricos dotados de silício, essa

sensibilidade cai bruscamente para ângulos de incidência altos, não obedecendo à lei dos co-senos.

b) Piranômetro Termoelétrico

Neste instrumento, o que dá forma ao que se denomina pilha termoelétrica são pares termoelétricos (termopares) ligados em série. Estes geram uma tensão elétrica proporcional à diferença de temperatura entre suas juntas, as quais se encontram em contato térmico com placas metálicas que se aquecem de forma distinta, quando iluminadas. A citada diferença de potencial medida na saída do instrumento pode ser relacionada com o nível de radiação incidente. São radiômetros que apresentam boa precisão, na faixa de 2% a 5%, podendo ser usados para medir radiação em escala diária, horária ou menor, com dependência do equipamento de aquisição de dados associado (Atlas Solarimétrico do Brasil, 2000).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. CARACTERIZAÇÃO DAS LOCALIDADES ESTUDADAS

Os dados de radiação solar global, radiação fotossinteticamente ativa e precipitação pluvial utilizados nesta pesquisa foram provenientes de estações meteorológicas automáticas pertencentes à empresa CENIBRA, localizada na bacia do rio Doce, estado de Minas Gerais (Figura 2), e de estações meteorológicas automáticas pertencentes à empresa FIBRIA, localizada nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha, estados da Bahia e do Espírito Santo (Figuras 3).

2

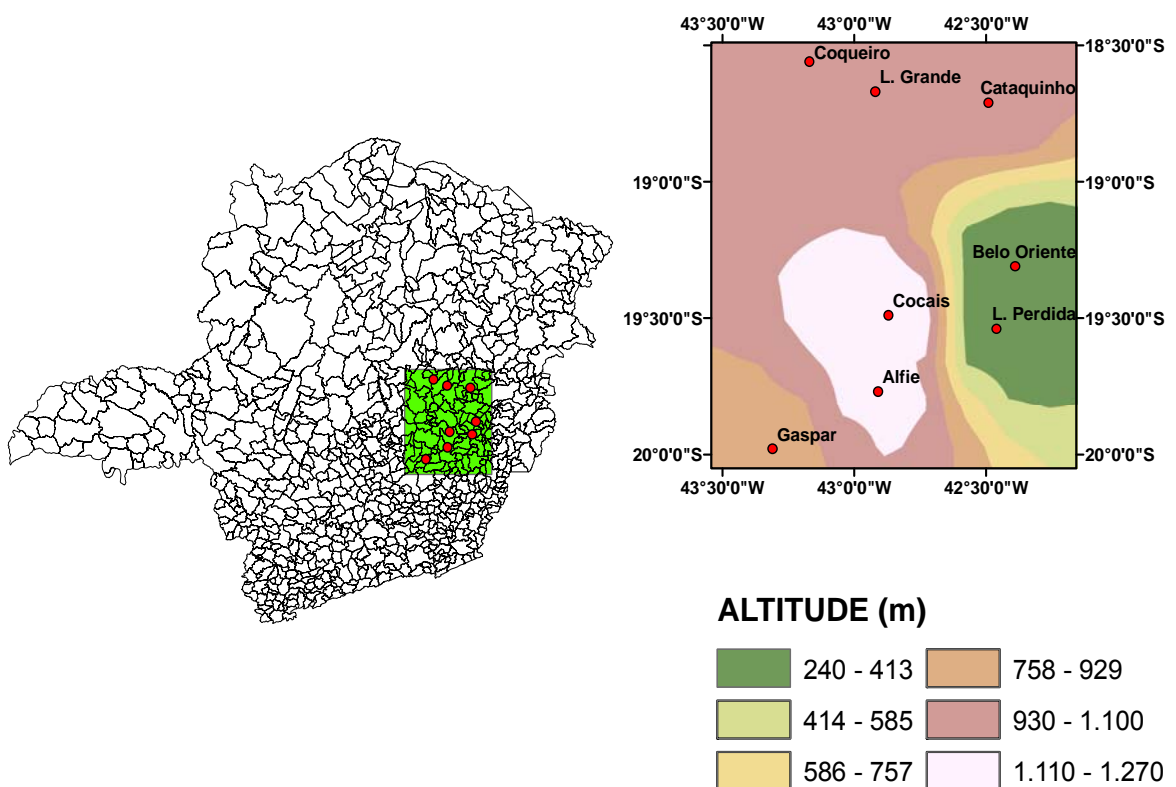


Figura 2. Posição geográfica das localidades estudadas no estado de Minas Gerais.

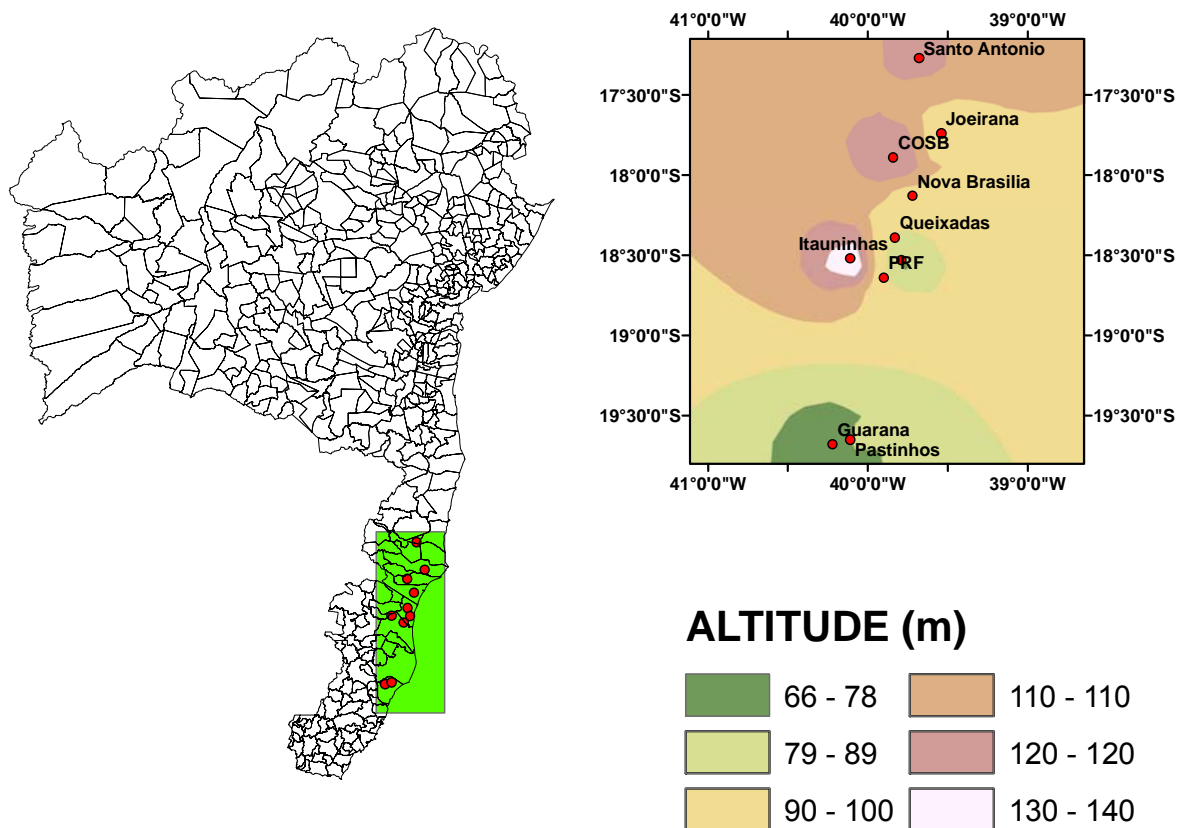


Figura 3. Posição geográfica das localidades estudadas no estado da Bahia e do Espírito Santo.

A ocupação do solo nas áreas estudadas é feita por florestas plantadas de eucalipto para fins de extração de papel e celulose. As coordenadas geográficas destas localidades são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Coordenadas geográficas das localidades estudadas.

Nome da área	Município - Estado	Latitude	Longitude	Altitude
Belo Oriente	Belo Oriente - MG	19°18'50"S	42°23'38"O	240 m
Lagoa Perdida	Caratinga - MG	19°32'14"S	42°27'25"O	310 m
Gaspar	Santa Bárbara - MG	19°59'00"S	43°18'19"O	847 m
Coqueiro	S ^{to} Antônio do Itambé - MG	18°33'17"S	43°10'03"O	993 m
Lagoa Grande	Sabinópolis - MG	18°39'58"S	42°55'16"O	1.012 m
Cataquinho	Peçanha - MG	18°42'24"S	42°29'25"O	1.015 m
Alfié	S. Domingos do Prata - MG	19°46'28"S	42°54'24"O	1.143 m

Tabela 1. Continuação.

Nome da área	Município - Estado	Latitude	Longitude	Altitude
Cocais	Antônio Dias - MG	19°29'19"S	42°51'54"O	1.273 m
Joeirana	Caravelas – BA	17°44'25"S	39°32'13"O	90 m
Nova Brasília	Mucuri – BA	18°08'00"S	39°42'56"O	94 m
Santo Antônio	Vereda – BA	17°15'55"S	39°41'05"O	117 m
COSB	Nova Viçosa - BA	17°53'35"S	39°50'20"O	134 m
Guaraná	Aracruz – ES	19°40'50"S	40°13'08"O	66 m
Pastinhos	Aracruz – ES	19°39'06"S	40°06'51"O	80 m
Santana	Conceição da Barra - ES	18°31'32"S	39°47'26"O	73 m
Queixadas	Conceição da Barra - ES	18°23'35"S	39°49'48"O	86 m
PRF	São Mateus - ES	18°38'30"S	39°54'01"O	91 m
Itauninhas	São Mateus - ES	18°31'25"S	40°06'46"O	144 m

3.2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS METEOROLÓGICOS

A radiação fotossinteticamente ativa e a irradiação solar global foram medidas, respectivamente, por meio de sensores quânticos (modelo PAR LITE, Kipp & Zonen B.V., Delft, Holanda) e de piranômetros (modelo SP LITE, Kipp & Zonen B.V., Delft, Holanda) (Figuras 4A). A precipitação foi medida utilizando-se pluviômetros (modelo CS700-L, Hydrological Services Pty., Liverpool, Austrália) (Figura 4B). Estes sensores foram instalados no topo de torres metálicas com 30 m de altura, de maneira a permanecerem devidamente nivelados acima do dossel vegetativo das árvores de eucalipto (Figura 4C). Os sensores foram conectados a sistemas de aquisição de dados (modelo CR10X, Campbell Scientific Inc., Utah, EUA), programados para realizarem 6 leituras por hora, em intervalos de 10 minutos, e armazenarem a média horária (Figura 4D).

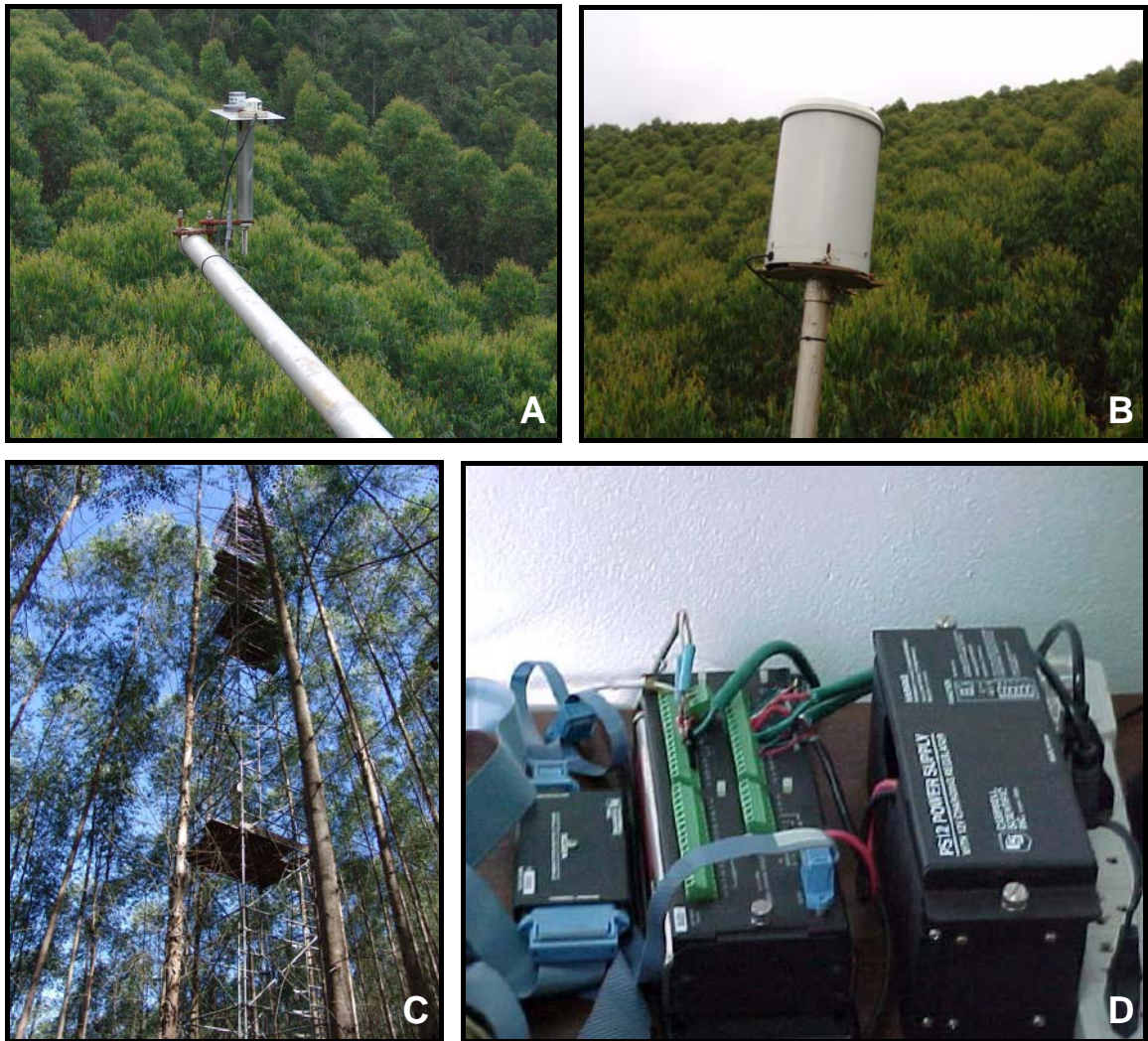


Figura 4. Sensores de radiação fotossinteticamente ativa (A), radiação solar global (A) e de precipitação pluvial (B), instalados no topo de torres meteorológicas (C) e conectados a sistemas modulares de aquisição de dados (D).

Os valores mensais de radiação solar global foram obtidos através da soma dos valores diários, expressos em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, para cada ano. De maneira semelhante, os valores mensais de radiação fotossinteticamente ativa também foram obtidos pela soma dos valores diários, sendo convertidos de $\mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ para $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$, para cada ano. Por outro lado, a precipitação pluvial mensal, expressa em mm, para cada ano foi obtida a partir do acúmulo dos valores registrados diariamente.

As conversões das unidades dos fluxos de fótons fotossintéticos da RFA foram realizadas conforme recomendado no manual da LI-COR (1991), onde o fator de conversão de $\mu\text{E J}^{-1}$ para W m^{-2} foi de $4,6 \mu\text{E J}^{-1}$, que é aproximadamente 8% do valor determinado por McCREE (1972).

Os erros observados nos valores de cada variável climática devido à falhas nos processos de aquisição, transferência e armazenamento de dados foram devidamente identificados, sendo eliminados os valores espúrios.

3.3. DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE MODELOS

As séries de dados de radiação fotossinteticamente ativa, radiação solar global e precipitação pluvial, coletadas em cada localidade estudada, foram compreendidas no período de 01 de janeiro de 2005 a 31 de dezembro de 2007. Os dados referentes aos dois primeiros anos (2005 e 2006) foram utilizados no desenvolvimento dos modelos de estimativa, enquanto os de 2007 foram utilizados na validação dos modelos.

Os dados empregados na obtenção dos parâmetros e na validação dos modelos foram divididos em partições anual, sazonal e espacial. Na partição anual, foram considerados os períodos de 01 de janeiro a 31 de dezembro de cada ano. Na partição sazonal, foram considerados como período chuvoso, a sequência dos quatro meses com maior precipitação ao longo do ano (novembro, dezembro, janeiro e fevereiro) e como período seco, os quatro meses com menor precipitação (maio, junho, julho e agosto). Já na partição espacial, foram consideradas as localizações de cada estação meteorológica estudada. A espacialização (interpolação) dos dados foi realizada por meio do programa computacional *ArcMap* versão 9.3. Essa interpolação de dados foi realizada com o método krigagem. Esse método assume estacionaridade dos dados, o que de certa forma tem pressuposição que os dados são provenientes de uma população com distribuição normal.

O desenvolvimento dos modelos de estimativa de RFA em função de R_g foi realizado por meio de regressões lineares simples, passando pelas origens dos eixos, utilizando-se a Equação 3.

$$RFA = a R_g \quad (3)$$

em que,

RFA - variável dependente associada a radiação fotossinteticamente ativa;

a – coeficiente angular da reta;

R_g - variável independente associada a radiação solar global.

Na validação dos modelos de estimativa de RFA em função de Rg, os valores estimados pelos modelos e medidos em campo foram correlacionados graficamente, sendo os valores estimados de RFA plotados no eixo das ordenadas (Y) e os valores medidos de RFA plotados no eixo das abscissas (X). Adicionalmente, foram plotados, em cada gráfico, retas com inclinação de 45° (1:1) com a finalidade de evidenciar subestimativas ou superestimativas em relação aos valores medidos.

3.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Avaliações dos desvios dos valores de RFA estimados pelos modelos em relação aos valores de RFA medidos, durante todo o ano de 2007, foram efetuadas a partir das determinações de índices estatísticos de precisão e exatidão, descritos pelas Equações 4 a 7.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (RFA_{est} - RFA_{med})}{n} \quad (4)$$

$$SEE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (RFA_{est} - RFA_{med})^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (RFA_{est} - RFA_{med})^2}{n} \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (RFA_{est} - RFA_{med})^2}{\sum_{i=1}^n (|RFA_{est} - \overline{RFA}_{med}| + |RFA_{med} - \overline{RFA}_{med}|)^2} \right] \quad (7)$$

em que,

MBE - média dos erros de estimativa;

SEE - erro padrão de estimativa;

RMSE - raiz quadrada da média dos erros ao quadrado;

d - índice de concordância de Willmott;

RFA_{est} - radiação fotossinteticamente ativa estimada pelo modelo;

RFA_{med} - radiação fotossinteticamente ativa medida pelo sensor quântico;

$\overline{RFA_{med}}$ - média da radiação fotossinteticamente ativa medida pelo sensor;

n- número de pares de dados.

O erro médio de estimativa (MBE) quantifica o desvio das médias e fornece informações quanto ao desempenho dos modelos no que se refere às subestimativas e/ou superestimativas, mas não sobre a dispersão dos dados. Uma desvantagem do MBE é que uma subestimativa individual anula uma superestimativa (GOMES & ESCOBEDO, 2002). Quanto mais próximo este índice for de zero, melhor será a exatidão da estimativa de RFA. Já o erro padrão de estimativa (SEE) mede a variabilidade em torno da reta de regressão ajustada, ou seja, o quanto a variável dependente (RFA estimada) e independente (RFA medida) está associada.

A raiz quadrada do erro médio de estimativa (RMSE) quantifica a magnitude do erro proporcionado pelo modelo, possibilitando avaliar a precisão do modelo de estimativa. O RMSE fornece uma informação em relação à dispersão dos valores, ou seja, sobre o grau de espalhamento obtido na correção entre os valores estimados e medidos. Quanto menor for o RMSE, menor será o desvio dos valores estimados pelo modelo em relação aos valores medidos e, assim, melhor o desempenho do modelo.

O índice de concordância de Willmott (d) não quantifica a magnitude do erro proporcionado pelo modelo, mas avalia a exatidão do modelo de estimativa. Indica o grau de concordância entre os valores preditos e observados, ressaltando-se que, quanto mais próximo de 1 (um), melhor o desempenho do modelo e, quanto mais próximo de 0 (zero), pior o desempenho do modelo (WILLMOTT et al., 1985).

A utilização conjunta dos índices estatísticos mencionados acima é a alternativa adequada para validação de modelos, pois permite análise simultânea

dos desvios da média, identificando a ocorrência de subestimativas e/ou superestimativas, dispersão e ajustamento das estimativas do modelo em relação às medidas em campo.

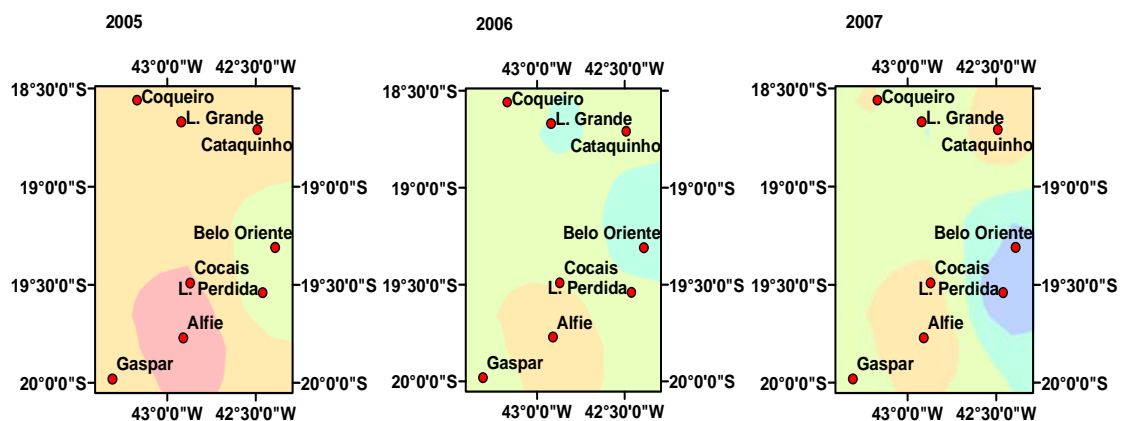
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. VARIABILIDADE DA RADIAÇÃO GLOBAL

As Figuras 5 e 6 mostram a variação média da radiação solar global nos períodos chuvosos e secos de 2005, 2006 e 2007, correspondentes às estações localizadas nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha. Esta variação observada pode ser explicada por dois fatores principais, a saber; pela ordem de importância: 1) Declinação solar, que justifica a maior exposição dos raios solares entre outubro (final) e fevereiro (início) e a menor entre abril (final) e agosto (início). 2) Coincidência do período chuvoso do ano com o verão e o período seco com o inverno. FRISINA et al. (1998), monitorando as radiações global em Botucatu, SP, encontraram variação média de $15 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ no inverno e $30 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ no verão. Segundo TEIXEIRA et al. (1994) para condições climáticas do municípios de Petrolina-PE, no período de junho a julho de 1994, os valores de RFA variaram de 9,8 a $20,3 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$. Esses resultados são semelhantes aos encontrados nas regiões das bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha, considerando os períodos chuvosos e secos, com mínimo $12 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ e máximo de $22 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ com média $17 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$.

De maneira geral, os menores valores de R_g , tanto para o período chuvoso como seco dos anos de estudos, são observados nas localidades de Alfié, Cocais, Lagoa Grande, COSB e Santo Antônio. Isso pode ser explicado pela maior elevação destes locais, o que promove maior resfriamento do ar atmosférico e a formação de nuvens (Tabela 1).

2



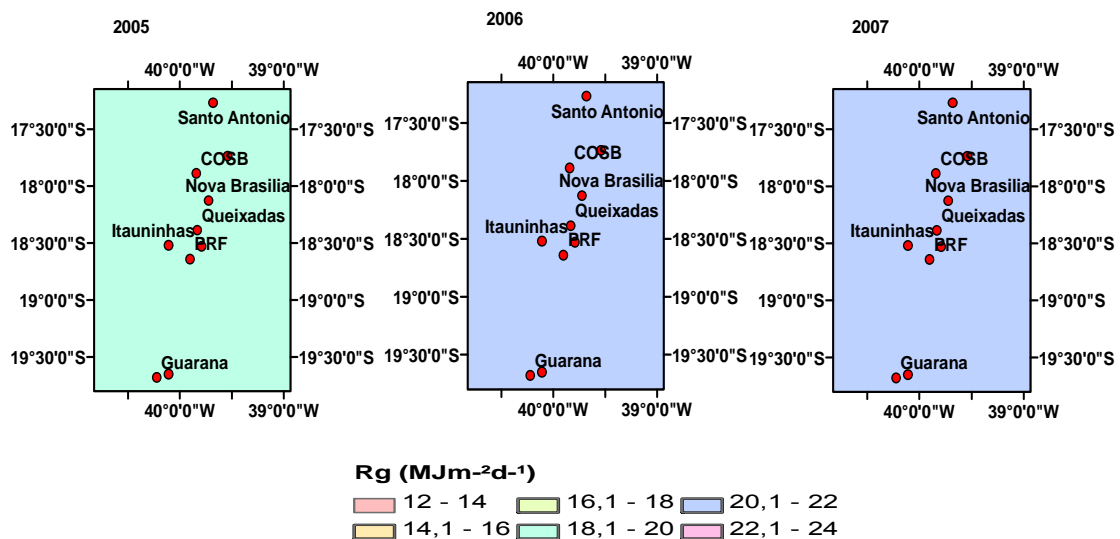


Figura 5 – Espacialização das médias da radiação solar global ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$) nos períodos chuvosos para os três anos do estudo (2005-2007) nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha.

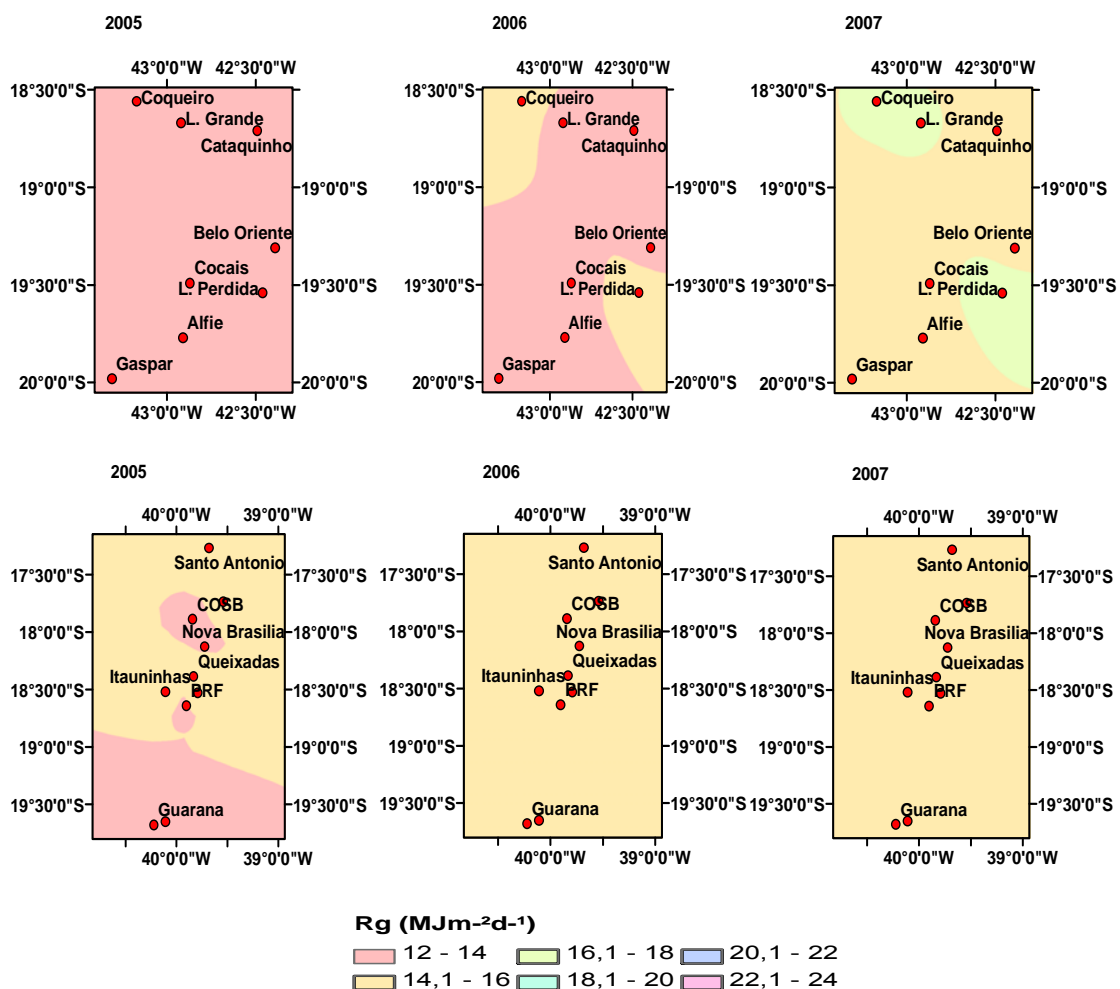


Figura 6 – Espacialização das médias da radiação solar global ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$) nos períodos secos para os três anos do estudo (2005-2007) nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha.

A Figura 7 ilustra a média geral da radiação global dos três anos de estudo para o período chuvoso e seco. No período chuvoso, as localidades de Belo Oriente e Santana tiveram as maiores médias da radiação global ($19,21 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $21,48 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$) sendo as menores médias pertencentes às localidades Alfie e Guaraná ($13,57 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $19,04 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$). No período seco as localidades Lagoa perdida e Queixadas estão com as maiores médias da radiação global ($14,83 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $14,81 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$), sendo a menor pertencente às localidades Cataquinho e Nova Brasília ($13,33 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $13,68 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$).

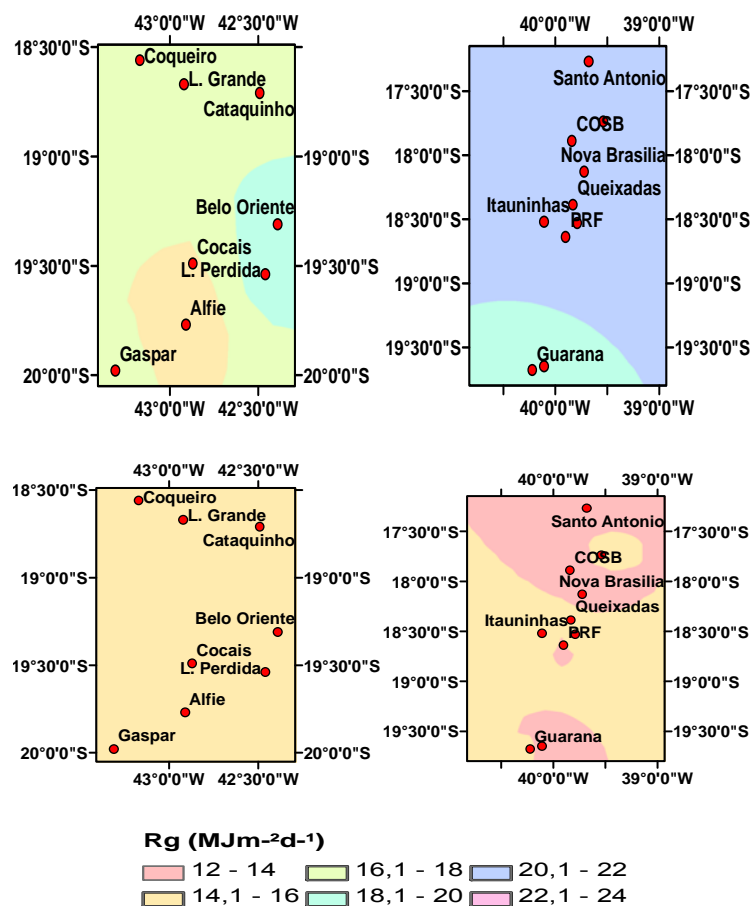


Figura 7 – Espacialização das médias geral da radiação solar global ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$) dos três anos do estudo para os períodos chuvosos e secos nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha.

4.2. VARIABILIDADE DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA

As Figuras 8 e 9 ilustram a distribuição espacial das médias da radiação fotossinteticamente ativa nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2005, 2006 e 2007 das estações localizadas nas bacias dos rios Doce, São Mateus e

Jequitinhonha. Esta variação observada pode ser explicada por dois fatores principais, a saber pela ordem de importância: 1) Declinação solar, que justifica a maior exposição dos raios solares entre outubro (final) e fevereiro (início) e a menor entre abril (final) e agosto (início). 2) Coincidência do período chuvoso do ano com o verão e o período seco com o inverno. Segundo TEIXEIRA et al. (1994) no período de observações, de junho a julho de 1994, nas condições climáticas do municípios de Petrolina-PE, os valores de RFA variaram de 20,2 a 40,6 molm⁻²d⁻¹. Esses resultados são semelhantes aos encontrados nas regiões das bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha, considerando os períodos chuvosos e secos, com mínimo 25 molm⁻²d⁻¹ e máximo de 50 molm⁻²d⁻¹ com média 37,5 molm⁻²d⁻¹.

De maneira geral, os menores valores de RFA, tanto para o período chuvoso como seco dos anos de estudos, são observados nas localidades de Alfíe, Cocais, Cataquinho, Lagoa Grande, COSB e Santo Antônio. Isso pode ser explicado pela maior elevação destes locais, o que promove maior resfriamento do ar atmosférico e a formação de nuvens (Tabela 1).

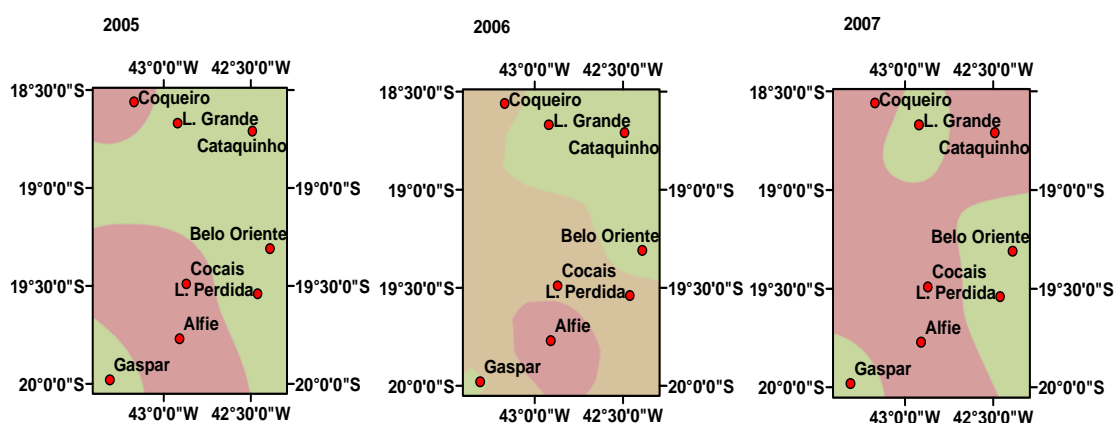


Figura 8 – Espacialização das médias da radiação fotossinteticamente ativa (molm⁻²d⁻¹) nos períodos chuvosos para os três anos do estudo (2005-2007) nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha.

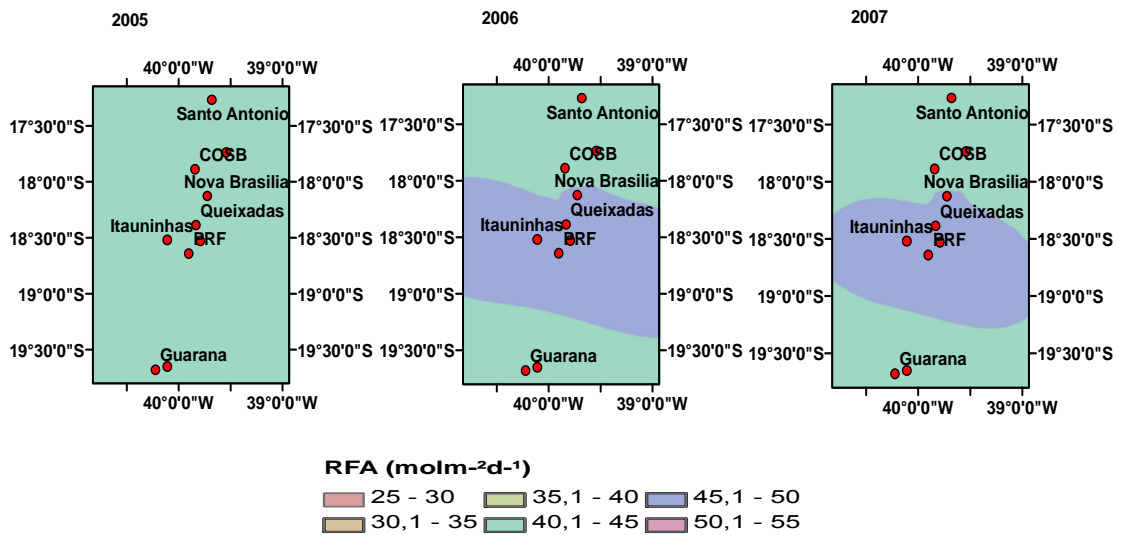


Figura 8 – Continuação

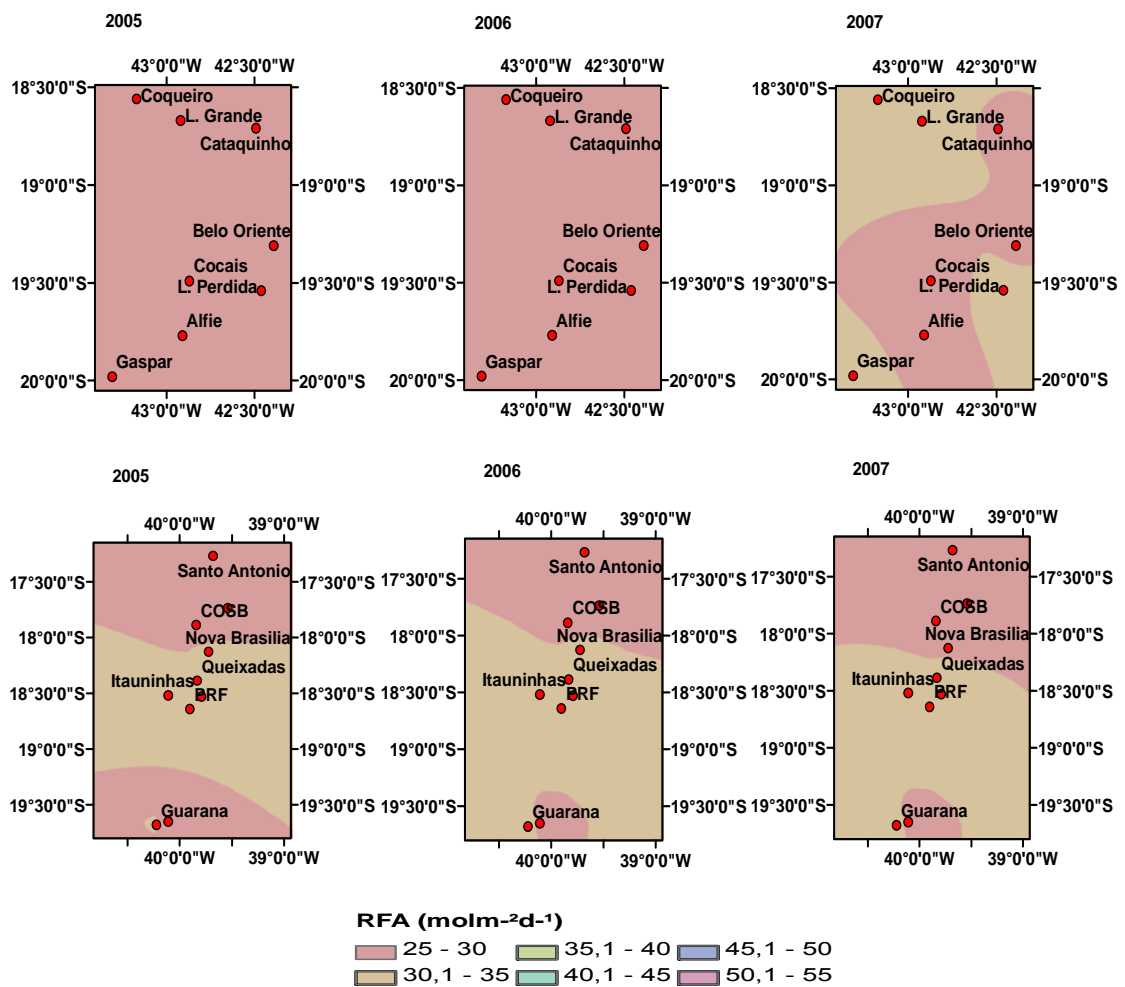


Figura 9 – Espacialização das médias da radiação fotossinteticamente ativa ($\text{molm}^{-2}\text{d}^{-1}$) nos períodos secos para os três anos do estudo (2005-2007) nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha.

A Figura 10 ilustra a média geral da RFA dos três anos de estudo para o período chuvoso e seco. No período chuvoso, as localidades Belo Oriente e Santana exibiram as maiores médias da radiação fotossinteticamente ativa ($39,4 \text{ molm}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $49,95 \text{ molm}^{-2}\text{d}^{-1}$) sendo as menores médias pertencentes às localidades Alfie e COSB ($29,14 \text{ molm}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $39,81 \text{ molm}^{-2}\text{d}^{-1}$). No período seco as localidades Gaspar e Santana apresentaram as maiores médias da radiação fotossinteticamente ativa ($30,76 \text{ molm}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $33,61 \text{ molm}^{-2}\text{d}^{-1}$) sendo os menores pertencentes às localidades Alfie e COSB ($27,41 \text{ molm}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $26,86 \text{ molm}^{-2}\text{d}^{-1}$).

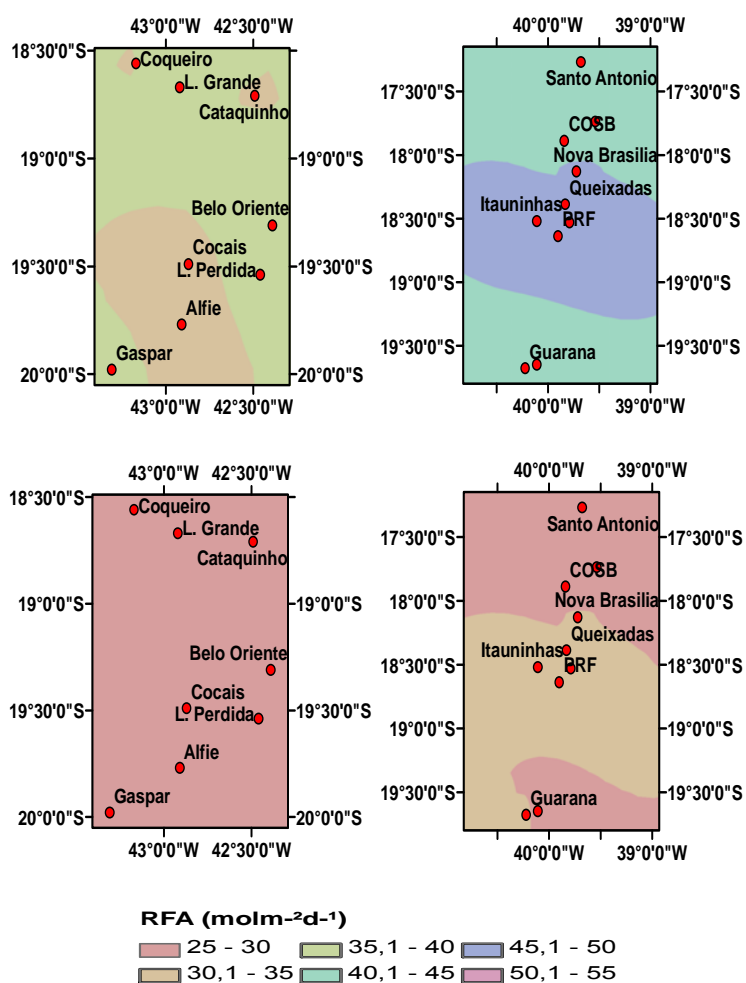


Figura 10 – Espacialização das médias geral da radiação fotossinteticamente ativa ($\text{molm}^{-2}\text{d}^{-1}$) dos três anos do estudo para os períodos chuvosos e secos nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha.

4.3. VARIABILIDADE DA RELAÇÃO RFA/Rg

A Figura 11 demonstra a variação espacial da razão entre a RFA ($\text{molm}^{-2}\text{d}^{-1}$) e Rg ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$) para as bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha

nos períodos chuvosos e secos. Verifica-se que, no geral, a razão RFA/Rg é sempre maior nos meses com maior índice pluviométricos no ano, que pode ser explicado pela maior concentração de vapor d'água na atmosfera neste período. O vapor d'água absorve radiação incidente na faixa do espectro de radiação referente ao infravermelho. Assim, no período chuvoso, a fração da radiação de infravermelho na componente da Rg é reduzido, minorando seu valor e assim aumentando a razão. Este resultado está de acordo com FRISINA et al. (1998), que encontraram valores para a relação entre a radiação fotossinteticamente ativa e global, sendo menor no inverno (39,13%), e maior no verão (44,07%), SILVA et al. (2006) trabalhando no ecossistema de manguezal em Bragança-PA verificaram variação na relação RFA/Rg de 40% a 45%. Segundo TEIXEIRA et al. (1994) a radiação solar na faixa do espectro de RFA foi cerca de 45% daquela do espectro solar, durante o período de junho a julho, nas condições climáticas do município de Petrolina-PE.

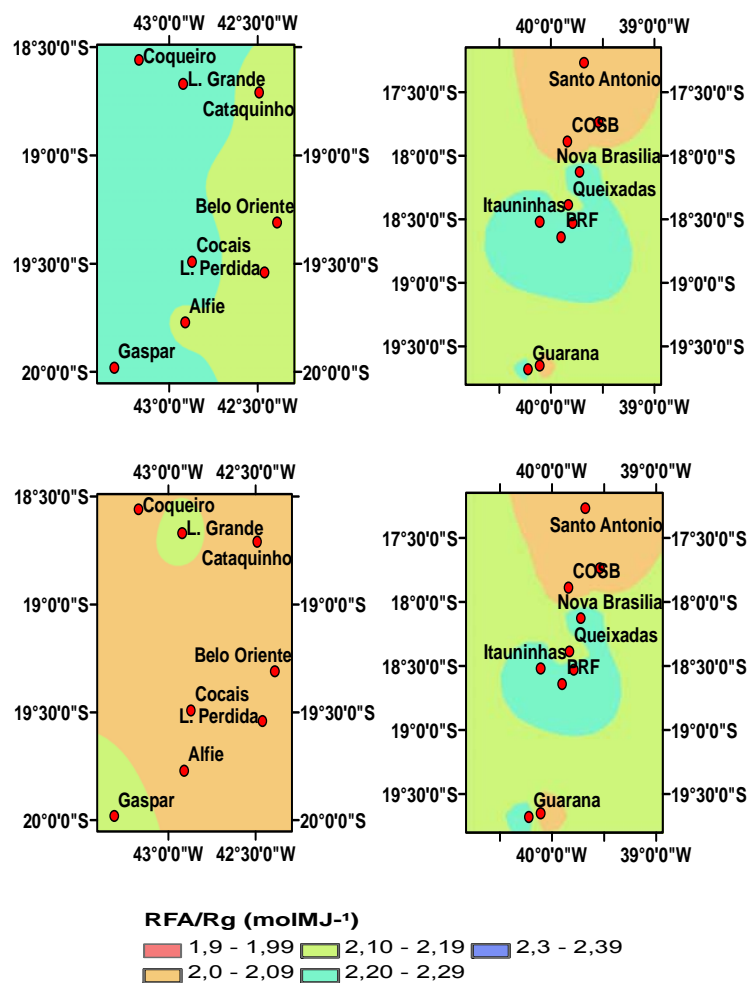


Figura 11 – Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa (molm⁻²d⁻¹) e radiação global (MJm⁻²d⁻¹) diárias médias nos períodos chuvosos e secos.

A análise da distribuição de frequência da relação RFA/Rg ao longo dos períodos chuvosos e secos dos anos de 2005, 2006 e 2007 estão apresentadas nas Figuras 12, 13, 14 e 15. O número de repetições dos maiores valores da relação RFA/Rg é maior nos períodos chuvosos, enquanto que o maior número de repetições dos menores valores estão concentrados na maior parte nos períodos secos. Houve a tendência de valores maiores durante a estação chuvosa, no entanto, ocorreram casos onde os menores valores estiveram também presentes nesse período. Isso mostra o efeito das variações da nebulosidade, hora do dia e elevação solar na magnitude dessa relação.

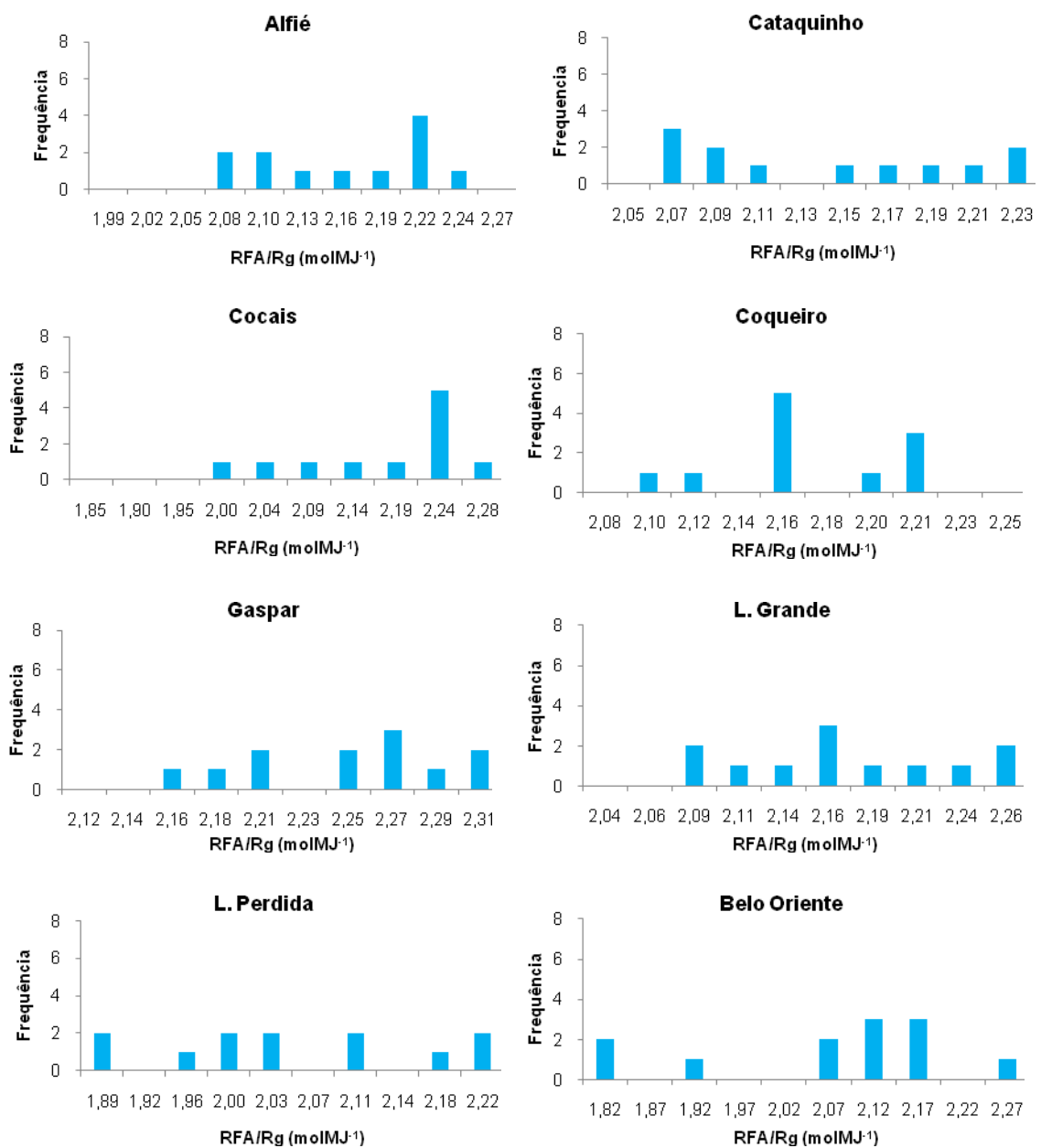


Figura 12 – Distribuição de número de ocorrências da RFA/Rg nos períodos chuvosos (■) dos três anos do estudo (2005 – 2007) na bacia do rio Doce - MG.

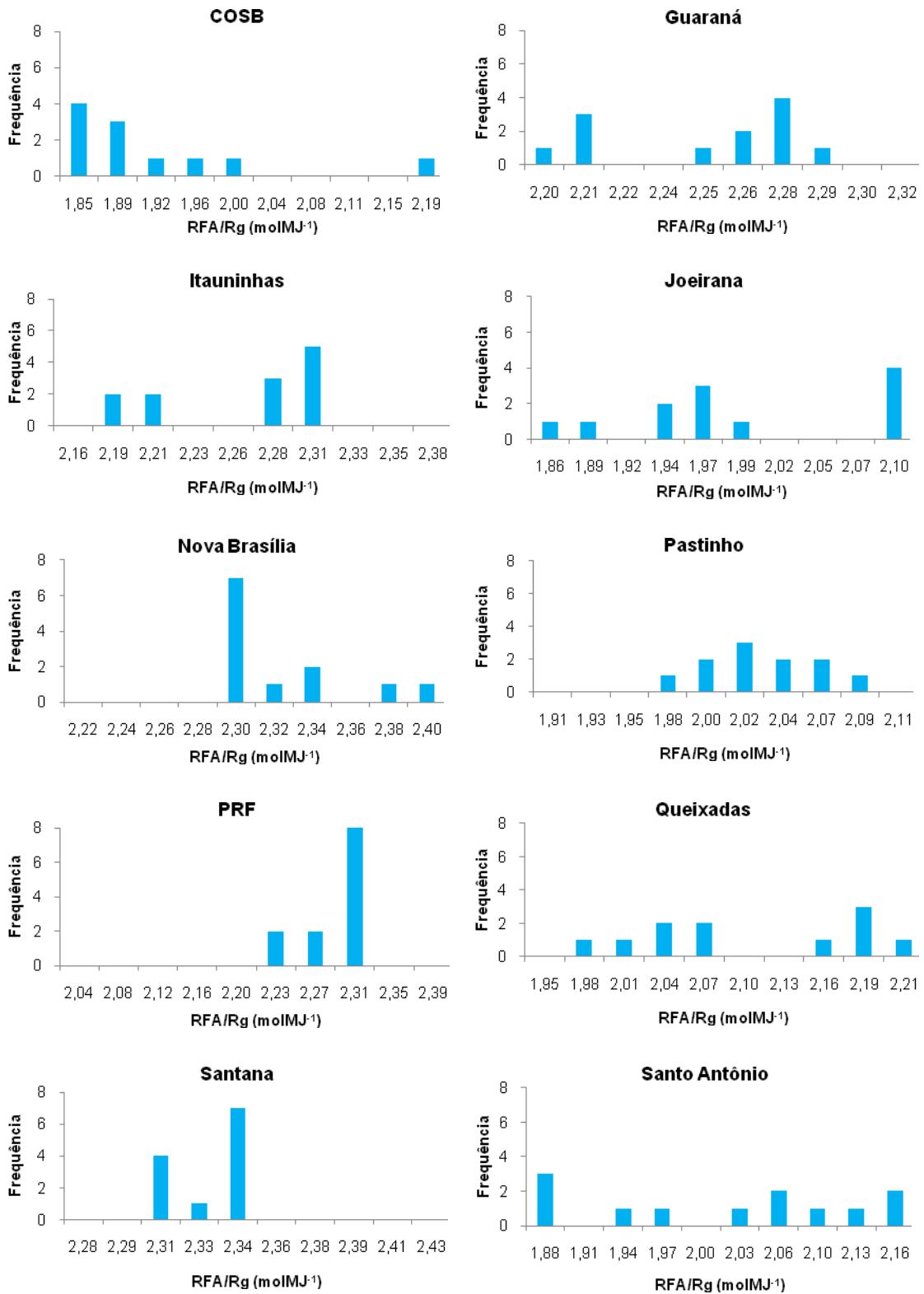


Figura 13 – Distribuição de número de ocorrências da RFA/Rg nos períodos chuvosos (■) dos três anos do estudo (2005 – 2007) nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha – ES e BA.

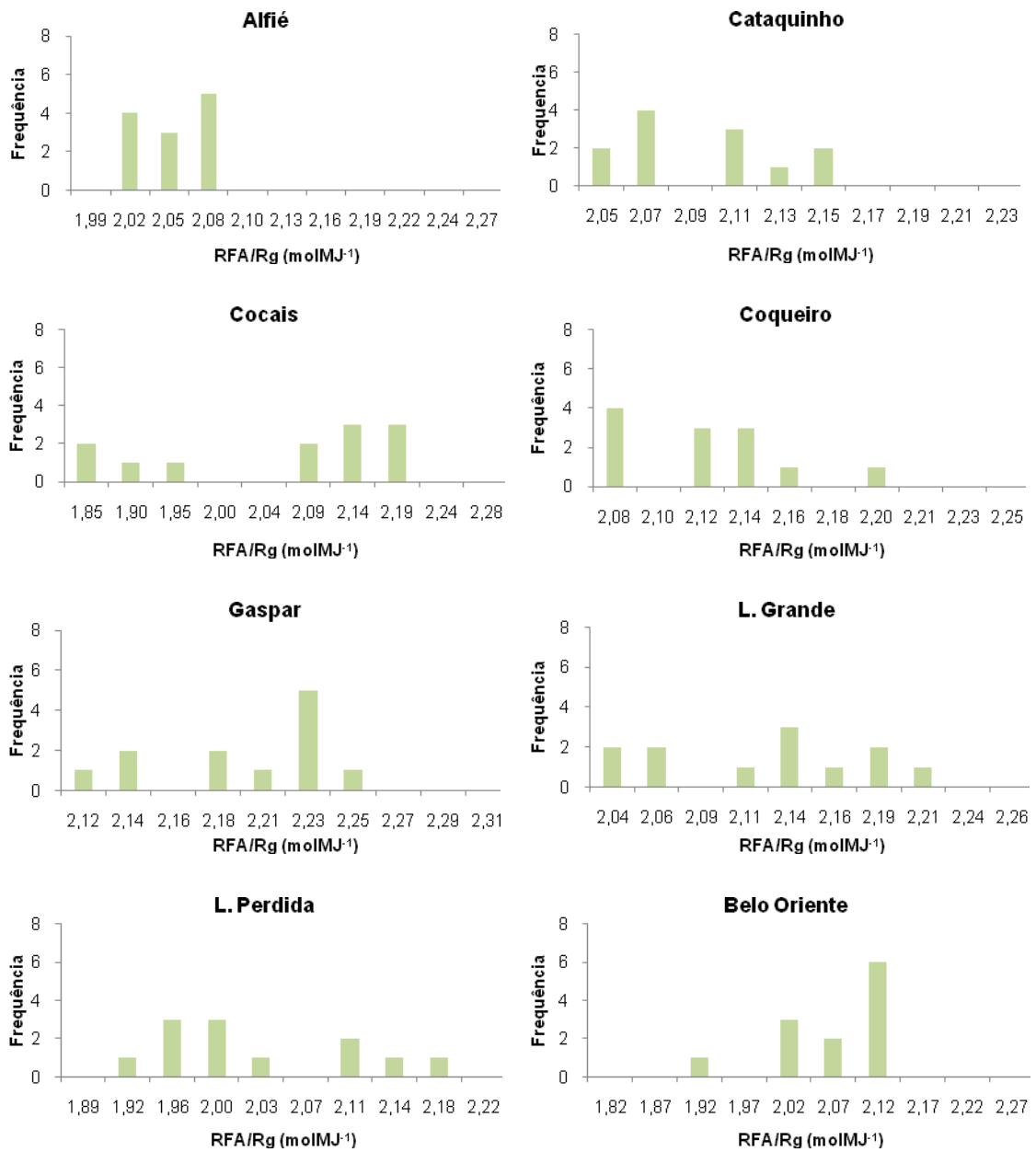


Figura 14 – Distribuição de número de ocorrências da RFA/Rg nos períodos secos (■) dos três anos do estudo (2005 – 2007), na bacia do rio Doce - MG.

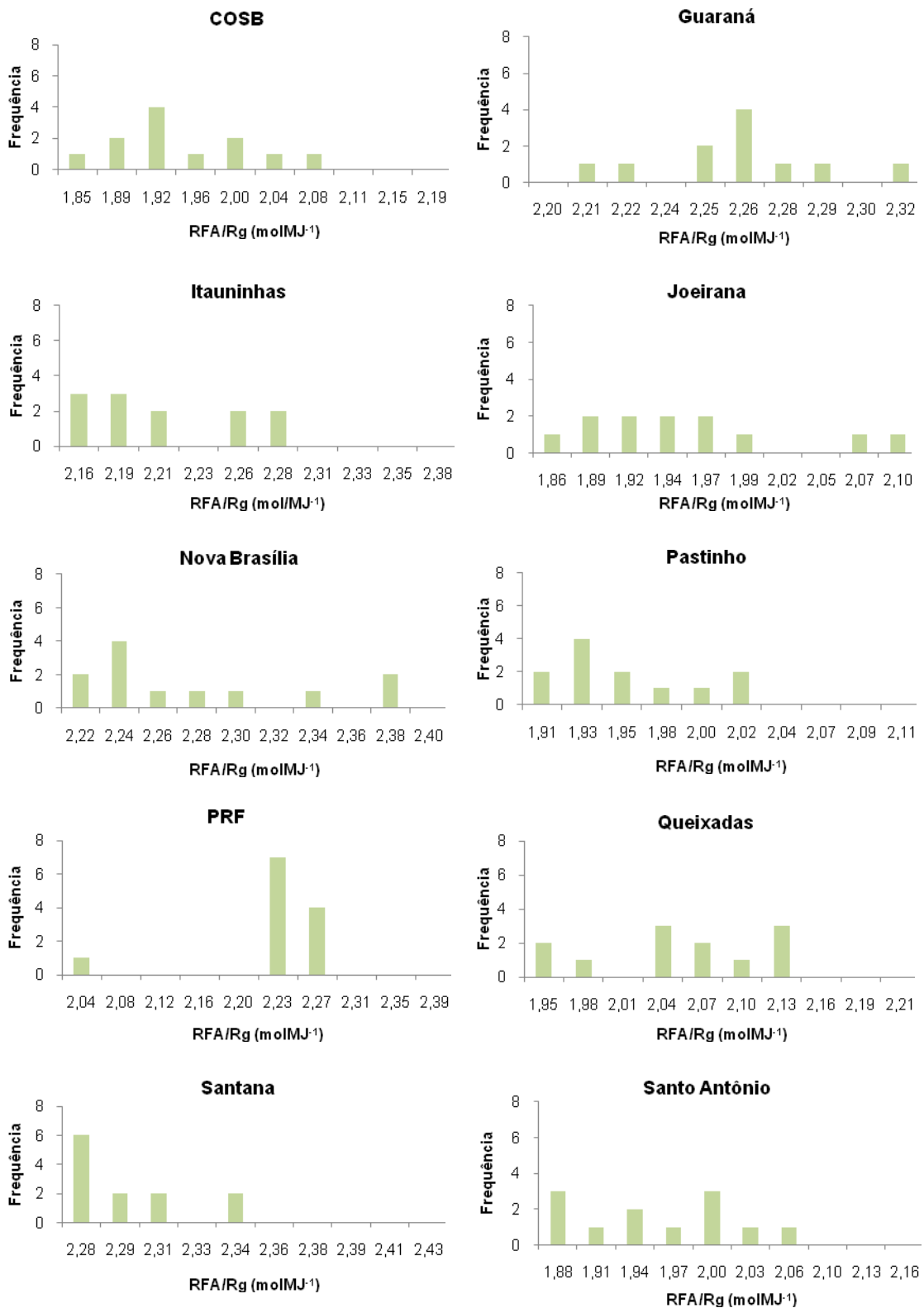


Figura 15 – Distribuição de número de ocorrências da RFA/Rg nos períodos secos (■) dos três anos do estudo (2005 – 2007), nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha – ES e BA.

A Figura 16 mostra a relação percentual entre a RFA/Rg a partir das médias mensais ao longo dos anos de 2005, 2006 e 2007, para as localidades das bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha. Na bacia do rio Doce (MG), a relação RFA/Rg varia de 45,0% a 48,0%, com média de 46,0%; enquanto que nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha (ES e BA) houve uma variação de 43,0% a 50,0%, com média de 47,0%. Analisando a sazonalidade da relação RFA/Rg em regiões da bacia do rio Doce, Estado de Minas Gerais, STEIDLE NETO et al. (2006) obtiveram valores variando entre 48 a 51% para períodos secos e de 47 a 49% para períodos chuvosos.

As maiores relações percentual são observadas nas localidades Gaspar e Santana, onde são encontradas altos valores na precipitação. Os resultados mostram que a relação RFA/Rg encontra-se dentro do intervalo de 44,0 a 69,0% (PAPAIOANNOU et al., 1976; ALADOS et al., 1996; ZHANG et al., 2000), dependendo da nebulosidade, dos aerossóis, da concentração de ozônio, do vapor de água na atmosfera, características para cada região em estudo. BRITTON & DODD (1976) encontraram um valor médio de 48% durante o verão e 46% no inverno dos Estados Unidos. Em Botucatu (SP), Gomes *et al.* (2002), trabalhando em escala diária obtiveram os mesmos 48% para a relação RFA /Rg.

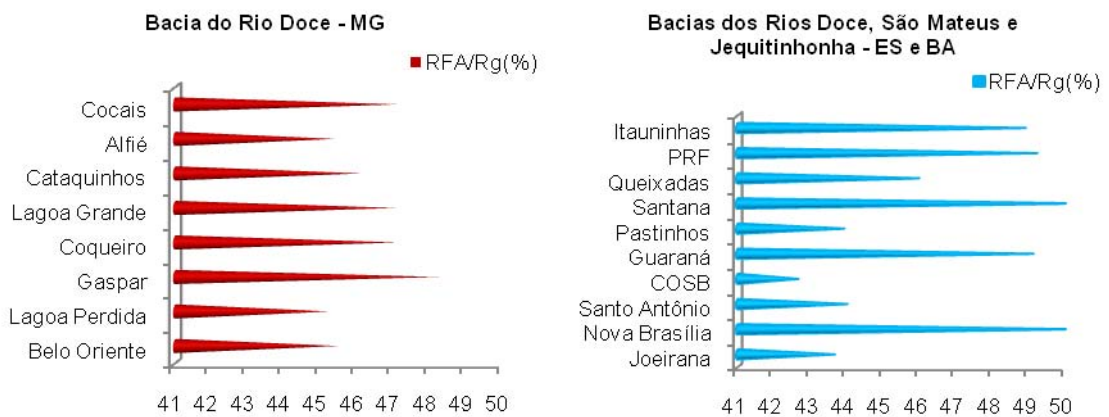


Figura 16 – Relação percentual entre RFA/Rg para a partição anual dos três anos do estudo (2005 – 2007).

As estações meteorológicas da empresa CENIBRA estão localizadas na bacia do Rio Doce, no estado de Minas Gerais, com concentração de chuvas nos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, caracterizado como período chuvoso. A estação seca é marcada pelo baixo volume de precipitação, com pouca nebulosidade e grande concentração de aerossóis na atmosfera.

STEIDLE NETO et al. (2006) obtiveram valores para RFA/Rg variando entre 1,99 a 2,09 ($\text{molMJ}^{-1}\text{d}^{-1}$) para o período geral, 2,01 a 2,14 ($\text{molMJ}^{-1}\text{d}^{-1}$) para períodos chuvosos e de 1,95 a 2,08 ($\text{molMJ}^{-1}\text{d}^{-1}$) para períodos secos, em regiões do estado de Minas Gerais. Os resultados apresentados nesse estudo, para essas mesmas regiões, variaram de 2,14 ($\text{molMJ}^{-1}\text{d}^{-1}$) para o período geral, 2,16 ($\text{molMJ}^{-1}\text{d}^{-1}$) para o chuvoso e de 2,10 ($\text{molMJ}^{-1}\text{d}^{-1}$) para o período seco.

As estações meteorológicas da empresa FIBRIA estão localizadas nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha, nos estados da Bahia e Espírito Santo, regiões litorâneas, com precipitação anual elevada e com distribuição uniforme de chuva ao longo dos anos. Esta região tem uma atmosfera com baixa concentração de aerossóis, elevada concentração de vapor d'água e muita nebulosidade. Os resultados apresentados variaram de 2,15 ($\text{molMJ}^{-1}\text{d}^{-1}$) para o período geral, 2,16 ($\text{molMJ}^{-1}\text{d}^{-1}$) para o chuvoso e de 2,12 ($\text{molMJ}^{-1}\text{d}^{-1}$) para o período seco.

Uma relação entre os fluxos de radiação fotossinteticamente ativa (em Em^{-2}) e de radiação global (em MJm^{-2}) foi determinada por ASSIS & MENDES (1989) para Rio Grande do Sul, onde a RFA pode ser estimada em 2,23 vezes a radiação global, com razão RFA pela radiação solar de 47%.

HOWELL et al. (1983) registraram na Califórnia a razão RFA pela radiação global em 2,009 para o período anual, 2,034 para o período chuvoso e 2,027 para o período seco. Valores próximos foram observados por FINCH et al. (2004), em Lusaka; 1,992 para o período anual, 2,097 para o período chuvoso e 2,014 para o período seco.

A Figura 17 mostra a variação média anual e sazonal da razão entre RFA ($\text{molm}^{-2}\text{d}^{-1}$) e a Rg ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$) para as bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha. Verifica-se que a média da razão RFA/Rg é sempre maior nas localidades das bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha (ES e BA), quando comparados às localidades da bacia do rio Doce (MG). Isso pode ser explicado pela maior concentração de vapor d'água na atmosfera dessas regiões litorâneas. O vapor d'água absorve radiação incidente na faixa do espectro de radiação referente ao infravermelho. Assim, nas localidades com maior frequência de dias chuvosos, a fração da radiação de infravermelho na componente da Rg é reduzido, diminuindo seu valor e assim aumentando a razão.

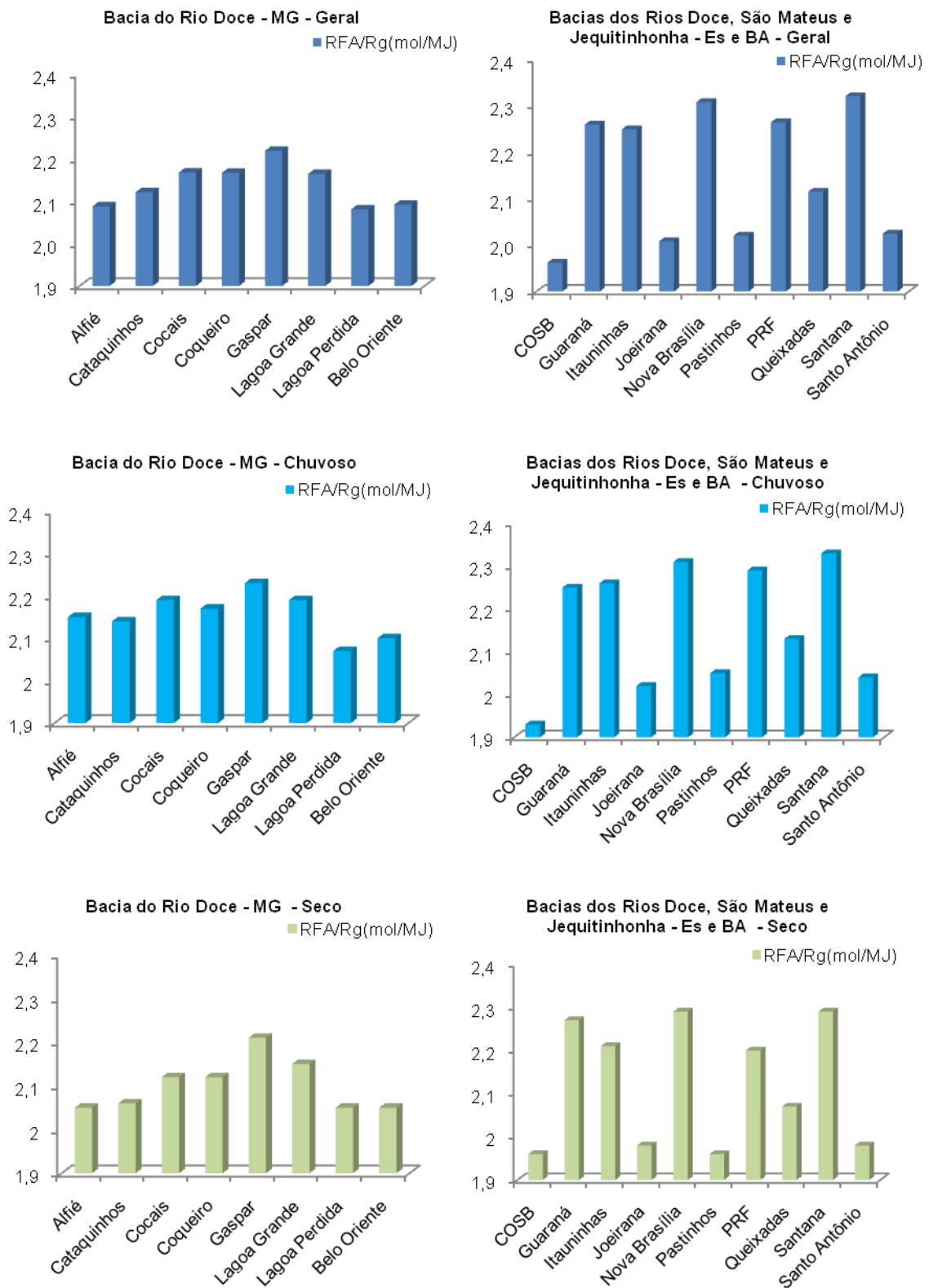


Figura 17 - Relação em molMJ⁻¹ entre a RFA e a Rg para a partição anual e sazonal dos três anos do estudo (2005 – 2007).

4.4. INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL NA RELAÇÃO RFA/RG

Na Tabela 2 encontra-se a variabilidade da precipitação total e sazonal ao longo dos anos de 2005 a 2007, em cada localidade estudada. Diferenças no comportamento da relação RFA/Rg podem ser notadas durante o período estudado, isso pode ser principalmente atribuído às variações relativas dos processos de absorção e espalhamento na atenuação da irradiação solar incidente pelas nuvens em diferentes regiões do espectro. As nuvens atenuam a irradiação solar incidente em comprimentos de onda maior que $0,7\mu\text{m}$ por ambos absorção e espalhamento, ao passo que a atenuação (pelas nuvens), no visível, deve-se somente ao espalhamento (DE VAULT e KTSAROS, 1983). No geral o esperado é que quando a localidade apresenta valores elevados na precipitação ocorra uma redução na radiação global, forçando um aumento na relação RFA/Rg.

Tabela 2. Precipitação pluvial total e sazonal para os anos de 2005 a 2007, ocorrida em cada localidade estudada.

Nome da área	Precipitação total (mm)	Precipitação sazonal (mm)	
		Chuvoso	Seco
Alfié	3.626,0	2.430,0	130,0
Cataquinho	3.649,0	2.346,0	179,0
Cocais	3.845,0	2.485,0	138,0
Coqueiro	4.095,0	2.579,0	116,0
Gaspar	4.015,0	2.554,0	161,0
Lagoa Grande	3.367,0	2.497,0	102,0
Lagoa Perdida	3.524,0	2.361,0	238,0
Belo Oriente	4.131,0	3.020,0	143,0
COSB	2.973,0	1.424,0	648,0
Guaraná	4.071,0	2.308,0	800,0
Itauninhas	3.349,0	1.726,0	514,0
Joeirana	4.828,0	2.325,0	1.031,0
Nova Brasília	4.447,0	1.986,0	951,0
Pastinhos	3.866,0	2.108,0	648,0
PRF	3.794,0	1.815,0	854,0
Queixadas	3.606,0	1.743,0	784,0
Santana	4.237,0	2.040,0	803,0
Santo Antônio	828,0	332,0	183,0

Nas Figuras 18 e 19 pode-se observar uma variação mensal da precipitação e da relação RFA/Rg nas estações meteorológicas localizadas na bacia dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha sendo, no geral, os meses com maior índice pluviométrico acompanhados dos maiores valores para a relação RFA/Rg. É apresentado a seguir a variação que a relação RFA/Rg sofre ao longo dos anos e entre as diferentes localidades das estações. A distribuição da precipitação na bacia do rio Doce (MG) ao longo dos anos possui elevada concentração no período chuvoso e baixa concentração no período seco, enquanto que nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha (ES e BA) a distribuição é bem uniforme em todas as estações meteorológicas. A relação RFA/Rg sofre uma variação não uniforme, evidenciando que diversos fatores como aerossóis, nebulosidade, pressão atmosférica, podem influenciar esta relação.

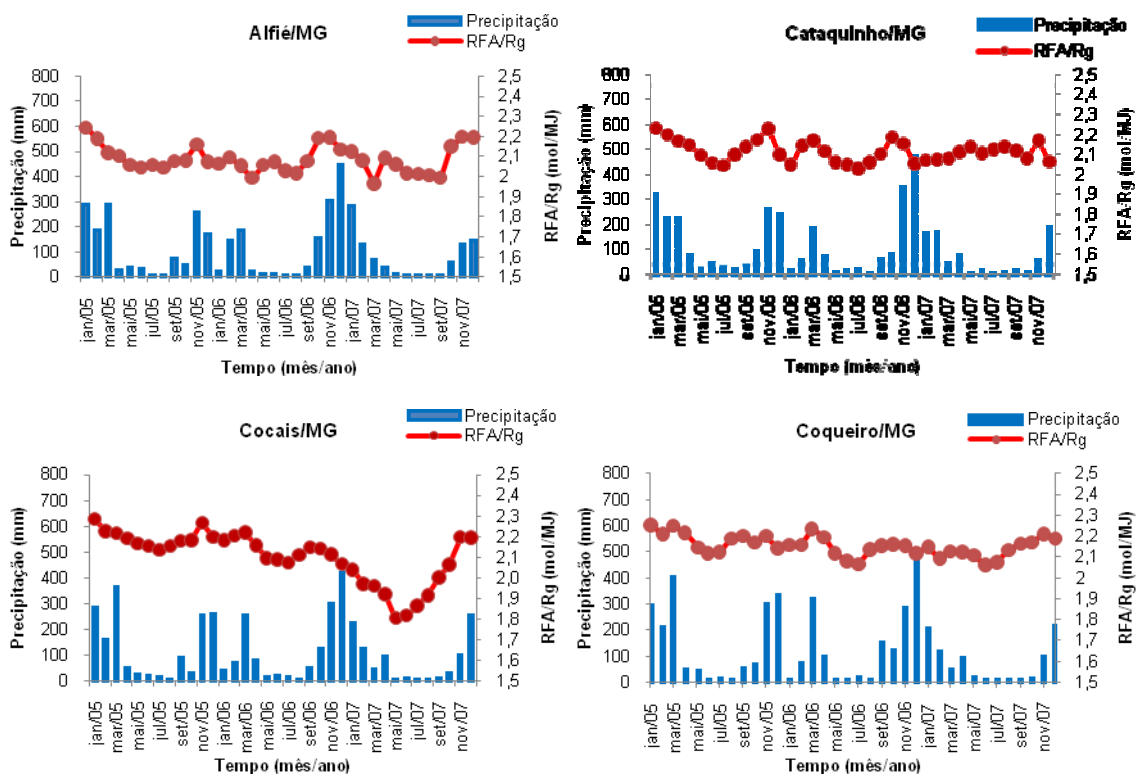


Figura 18 - Variação mensal da precipitação e da relação RFA/Rg para os três anos do estudo (2005 - 2007) na bacia do Rio Doce.

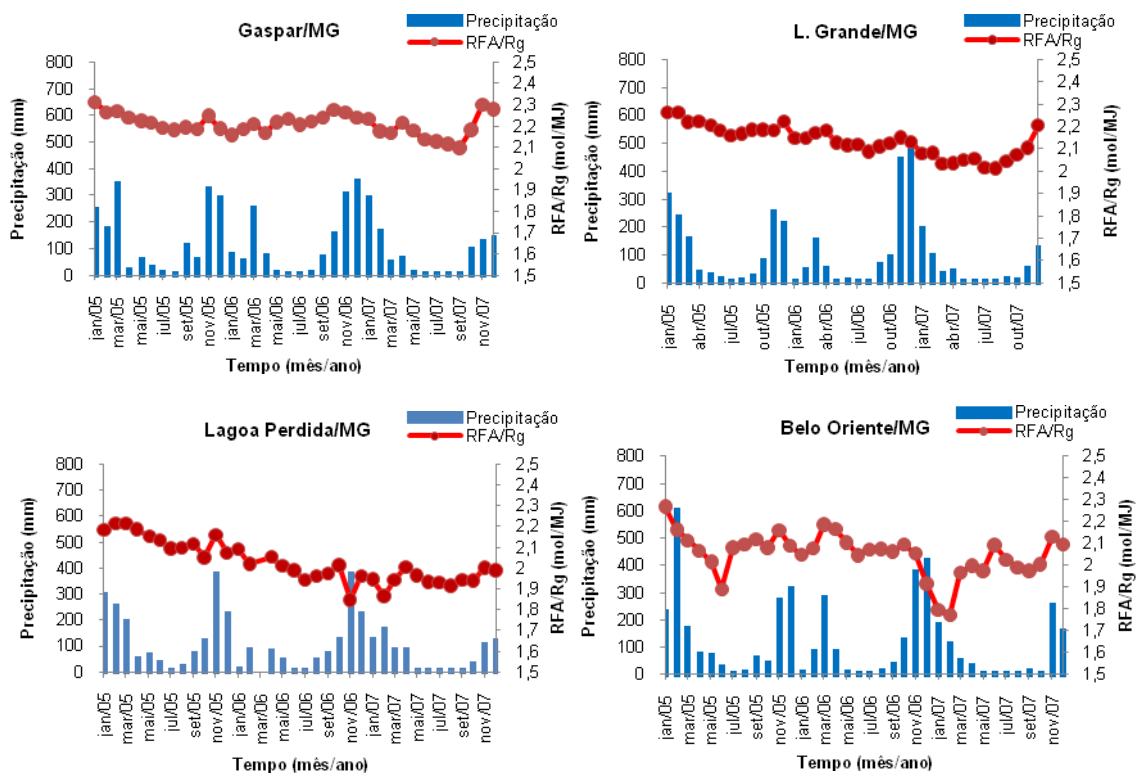


Figura 18 – Continuação.

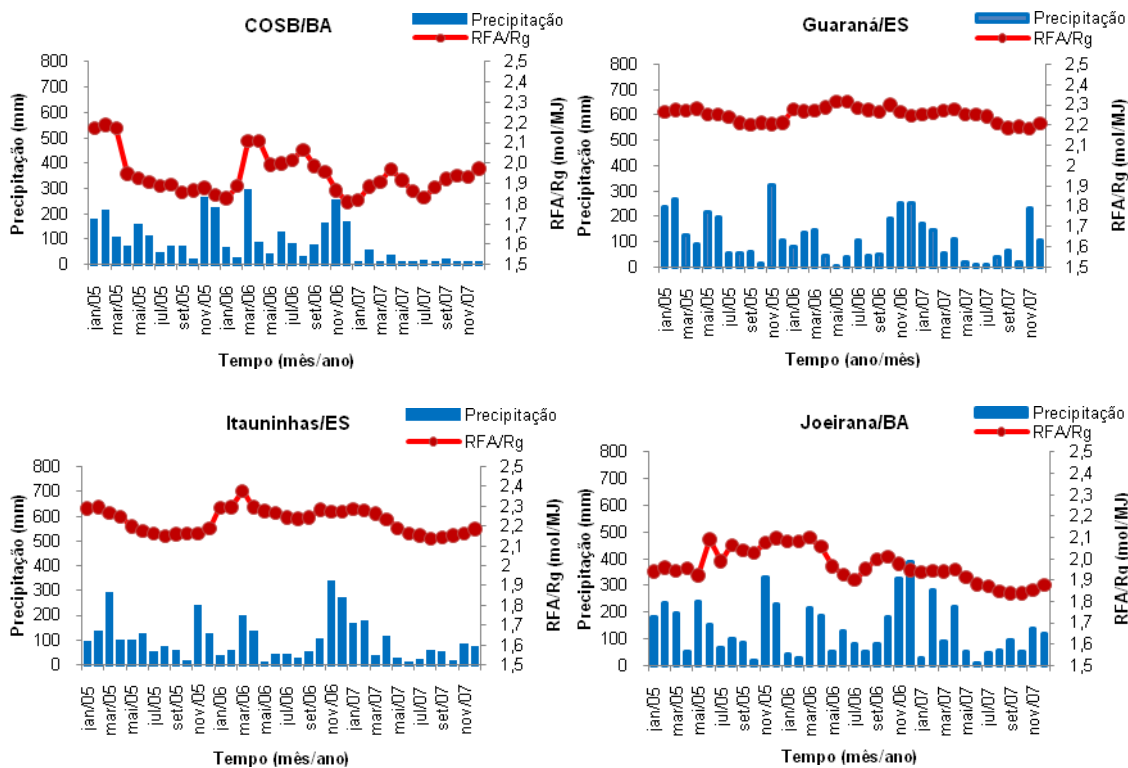


Figura 19 - Variação mensal da precipitação e da relação RFA/Rg para os três anos do estudo (2005 - 2007) nas bacias dos Rio Doce, São Mateus e Jequitinonha.

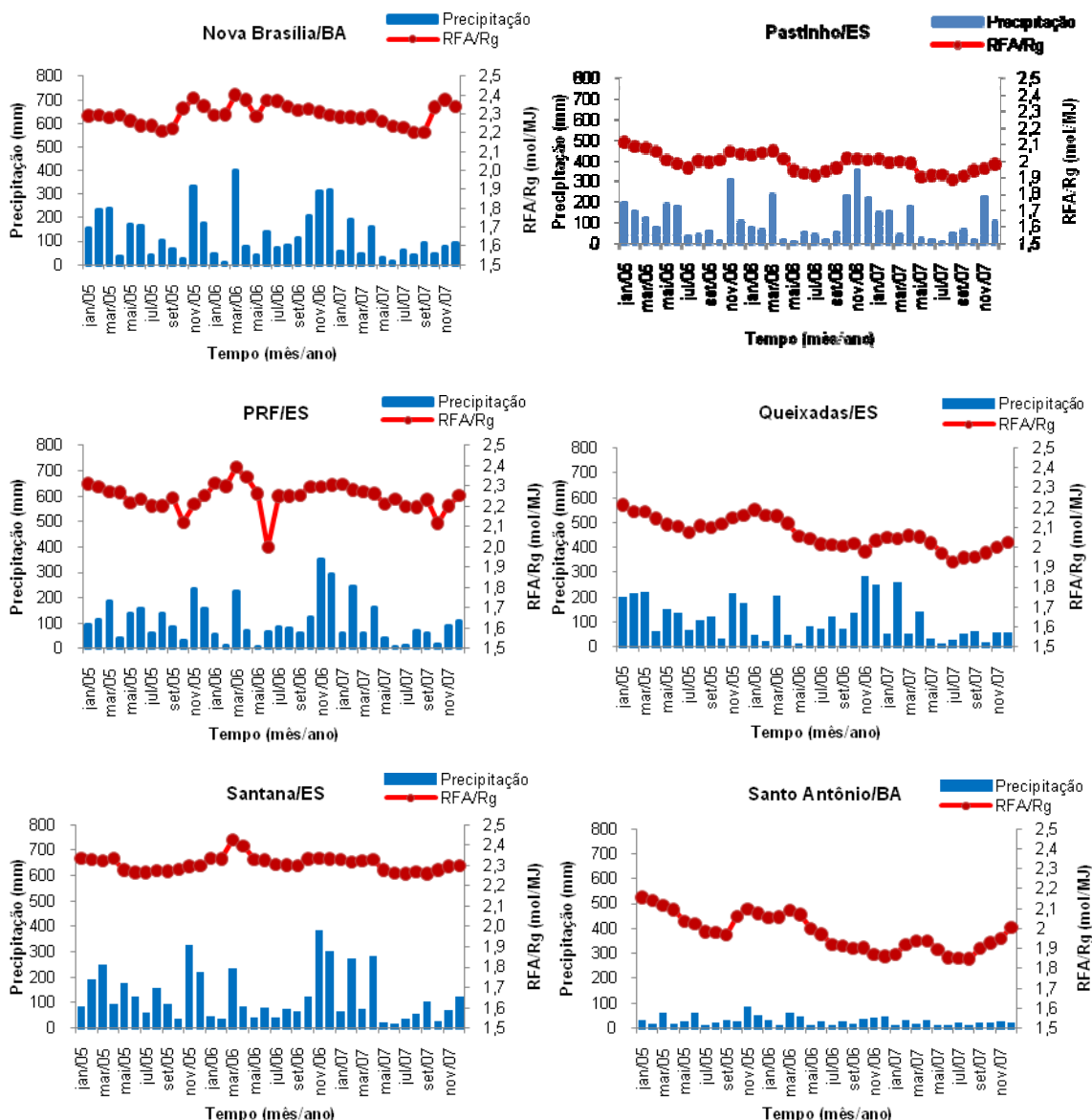


Figura 19 – Continuação.

A Figura 20 e 21 exibe a variação sazonal da relação radiação fotossinteticamente ativa pela radiação global ao longo dos períodos chuvosos e secos dos anos de 2005, 2006 e 2007 nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha. Em geral, a relação RFA/Rg foi maior nos períodos chuvosos quando comparados com o período seco, considerando-se não somente os valores médios, mas também as dispersões representadas pelas barras de desvio. Devido a uma variação na distribuição da precipitação ao longo dos anos do estudo, constata-se uma maior variação no valor da razão RFA pela Rg. A maior alternância de dias com e sem eventos de chuva no período chuvoso explica os maiores desvios observados nesta época do ano. No período seco o

predomínio de um centro de alta pressão na região sudeste do Brasil inibe a nebulosidade sendo verificados maiores números de dias com céu claro justificando os menores desvios observados nesta época do ano.

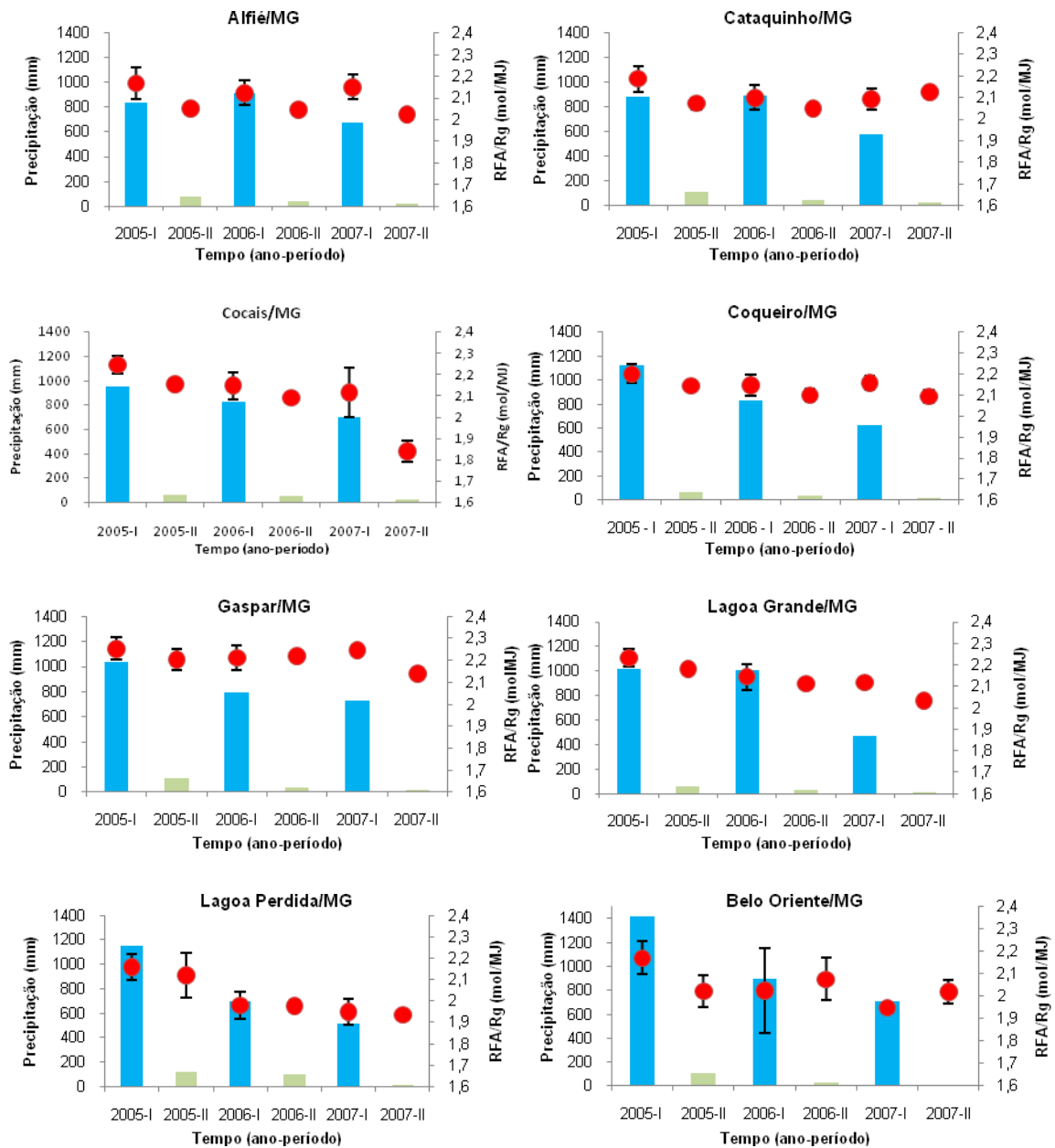


Figura 20 - Variação sazonal da relação RFA/Rg ao longo dos períodos chuvosos e secos para os três anos do estudo (2005 – 2007) na bacia do Rio Doce.

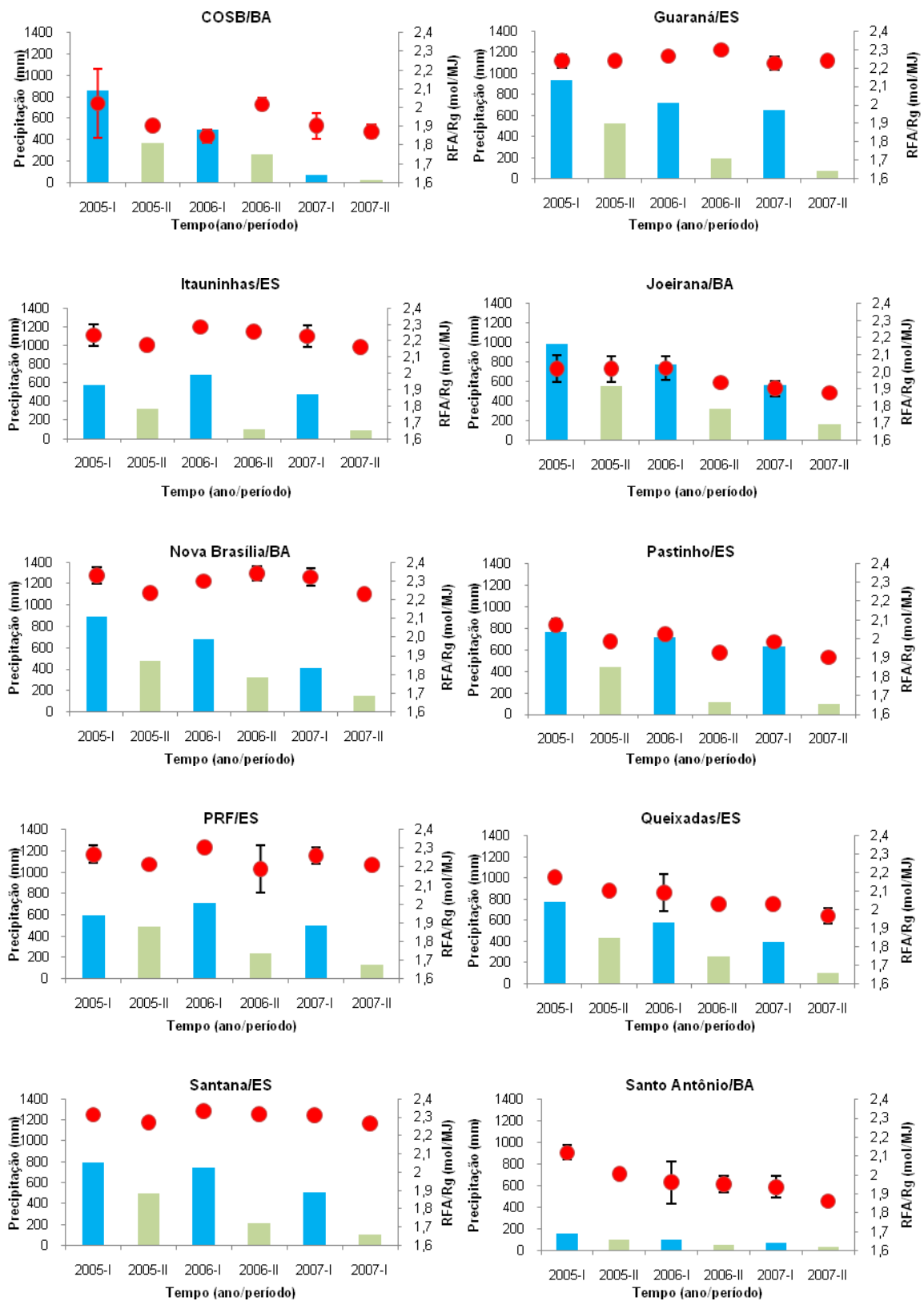


Figura 21 - Variação sazonal da relação RFA/Rg ao longo dos períodos chuvosos e secos para os três anos do estudo (2005 – 2007) nas bacias dos Rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha.

A Figura 22 e 23 representa a tendência da relação radiação fotossinteticamente ativa pela radiação global nos anos de 2005, 2006 e 2007 nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha. Ao longo dos anos pode-se constatar uma redução na precipitação e na relação RFA/Rg. A redução na concentração de vapor d'água e aumento de aerossóis na atmosfera podem aumentar a radiação global forçando a redução da relação.

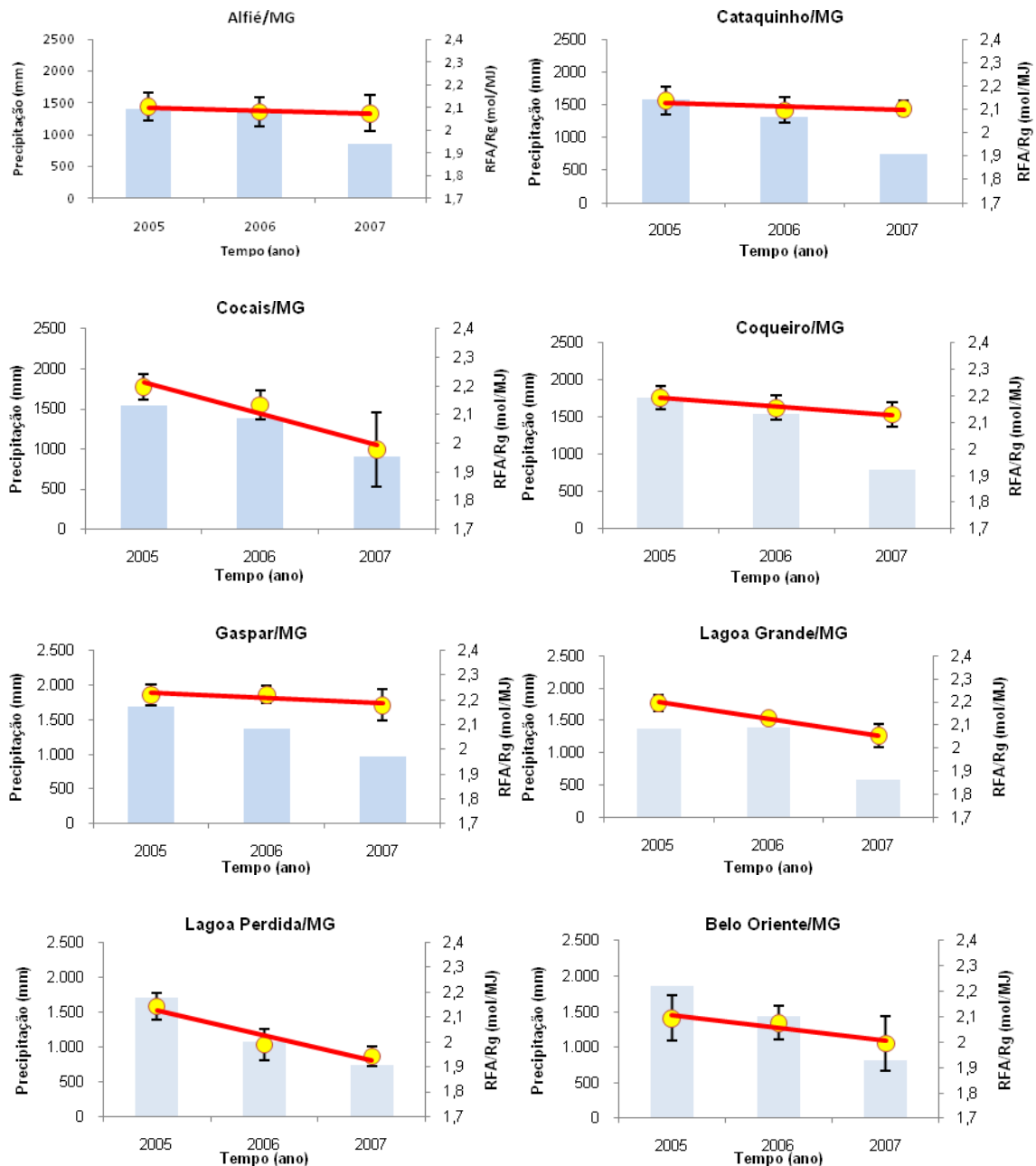


Figura 22 - Variação interanual da precipitação e da relação RFA/Rg nos anos de 2005, 2006 e 2007 na bacia do Rio Doce.

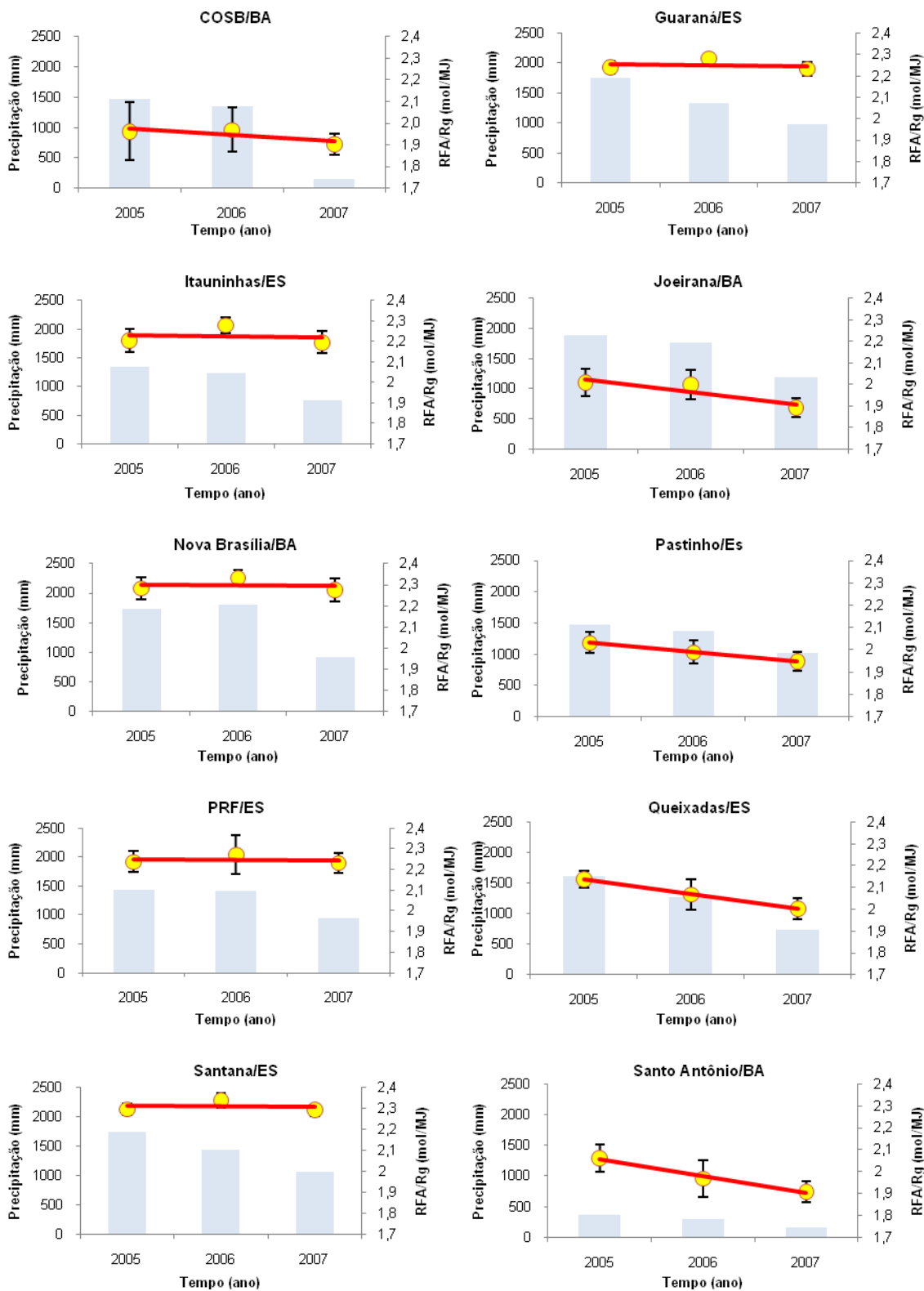


Figura 23 - Variação interanual da precipitação e da relação RFA/Rg nos anos de 2005, 2006 e 2007 nas bacias dos Rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha.

4.5. MODELAGEM DA RELAÇÃO RFA/RG

As equações para as diferentes partições foram encontradas por meio de regressão linear simples com partição anual e sazonal. Os coeficientes angulares (A) e o coeficiente de determinação (R^2) serão apresentados em forma de tabela, devido a grande quantidade e por serem similares em termos de distribuição (Tabela 3). De acordo com as tabelas, pode-se observar que em todos os meses obtiveram-se altos valores de coeficientes de determinação (R^2), variando de 0,93 a 0,99, mostrando a forte relação entre a RFA e a radiação global. Verificando a tabela 3, onde são apresentadas as equações para os modelos, verifica-se que o coeficiente angular apresentou valor médio de 2,154 para o período anual, 2,167 para o período chuvoso e 2,121 para o período seco. Valores próximos foram observados por UDO e ARO (1999) na Nigéria, que obtiveram 2,079 para a partição anual, 2,120 e 2,020 para a partição sazonal chuvoso e seco respectivamente.

Tabela 3. Coeficiente angular (A) e coeficiente de determinação (R^2) dos modelos gerados para a relação RFA/Rg, considerando a série histórica de dados dos anos de 2005 e 2006 para as 20 estações meteorológicas, situadas nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha.

Estações	Anual (2005 - 2006)		Chuvoso		Seco	
	A	R^2	A	R^2	A	R^2
Alfié	2,088	0,987	2,136	0,989	2,046	0,995
Cataquinho	2,122	0,992	2,135	0,990	2,061	0,996
Cocais	2,168	0,994	2,195	0,992	2,119	0,996
Coqueiro	2,167	0,993	2,172	0,992	2,124	0,993
Gaspar	2,219	0,986	2,224	0,994	2,210	0,997
Lagoa Grande	2,165	0,996	2,171	0,994	2,139	0,996
Lagoa Perdida	2,081	0,996	2,103	0,975	2,040	0,979
Belo Oriente	2,092	0,980	2,093	0,979	2,058	0,977
COSB	1,962	0,956	1,935	0,934	1,964	0,970
Guaraná	2,260	0,996	2,256	0,995	2,269	0,994
Itauninhas	2,250	0,991	2,268	0,994	2,216	0,989

Tabela 3. Continuação

Estações	Anual (2005 - 2006)		Chuvoso		Seco	
	A	R ²	A	R ²	A	R ²
Joeirana	2,005	0,988	2,020	0,985	1,975	0,974
Nova Brasília	2,308	0,992	2,309	0,996	2,287	0,976
Pastinho	2,021	0,991	2,051	0,995	1,956	0,988
PRF	2,265	0,988	2,292	0,996	2,207	0,968
Queixadas	2,115	0,988	2,142	0,985	2,066	0,990
Santana	2,321	0,996	2,327	0,997	2,294	0,996
Santo Antônio	2,025	0,981	2,039	0,970	1,976	0,989
Média	2,154	0,989	2,167	0,987	2,121	0,988

4.6. VALIDAÇÃO DOS MODELOS DA RELAÇÃO RFA/RG

As Figuras 24, 25, 26 e 27 representam as correlações obtidas entre os valores estimados através do modelo e medidos da componente RFA, bem como a reta ideal 1:1 (com 45° graus de inclinação). Observa-se uma boa distribuição dos pontos ao longo da reta, justificado pela excelente predição dos modelos.

Comparando as equações anuais com as sazonais, pode-se notar que, para maioria das estações meteorológicas os coeficientes de determinação foram maiores na partição sazonal, no entanto, as diferenças podem ser consideradas pequenas.

Os melhores resultados são apresentados nas Figuras 24, 25, 26 e 27 pelos modelos sazonais, na atual versão da dissertação, enquanto que os gráficos com as relações anuais (gerais) entre a RFA medida e a RFA estimada pelos modelos estão no Anexo.

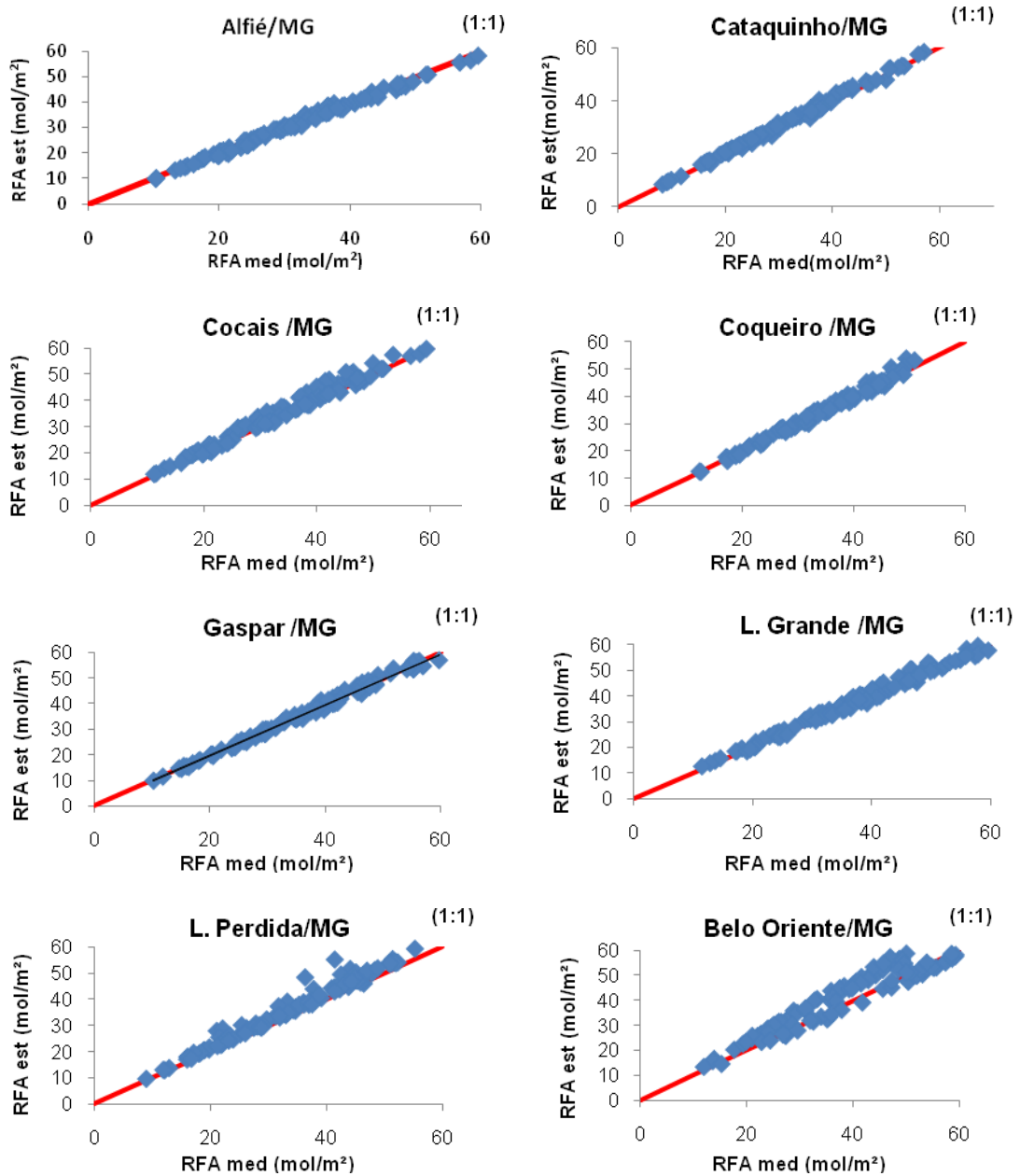


Figura 24 – Relação entre a RFA medida e a RFA estimada pelos modelos para o período chuvoso considerando os dados referentes ao ano de 2007, na bacia do rio Doce.

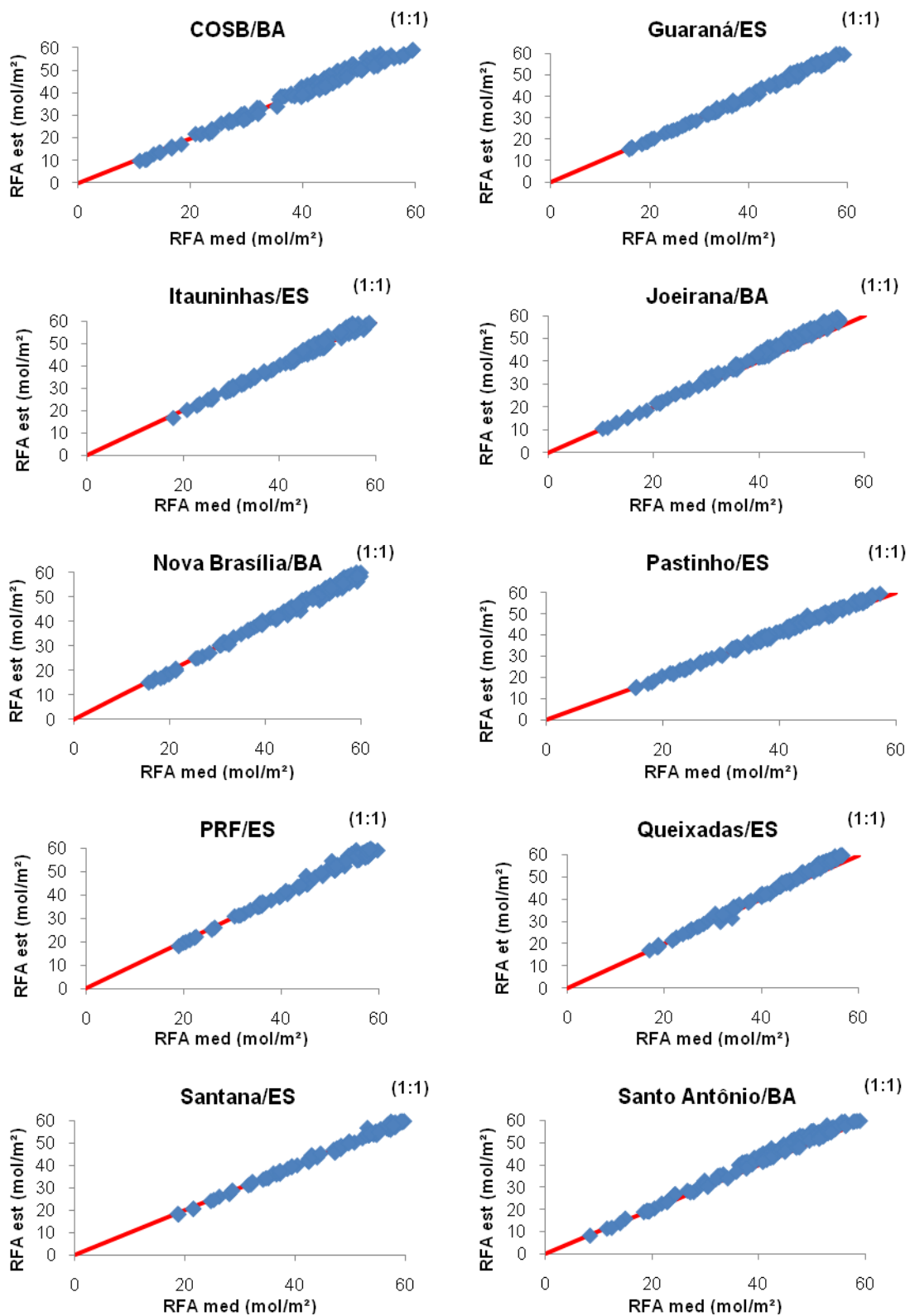


Figura 25 – Relação entre a RFA medida e a RFA estimada pelos modelos para o período chuvoso considerando os dados referentes ao ano de 2007, nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha.

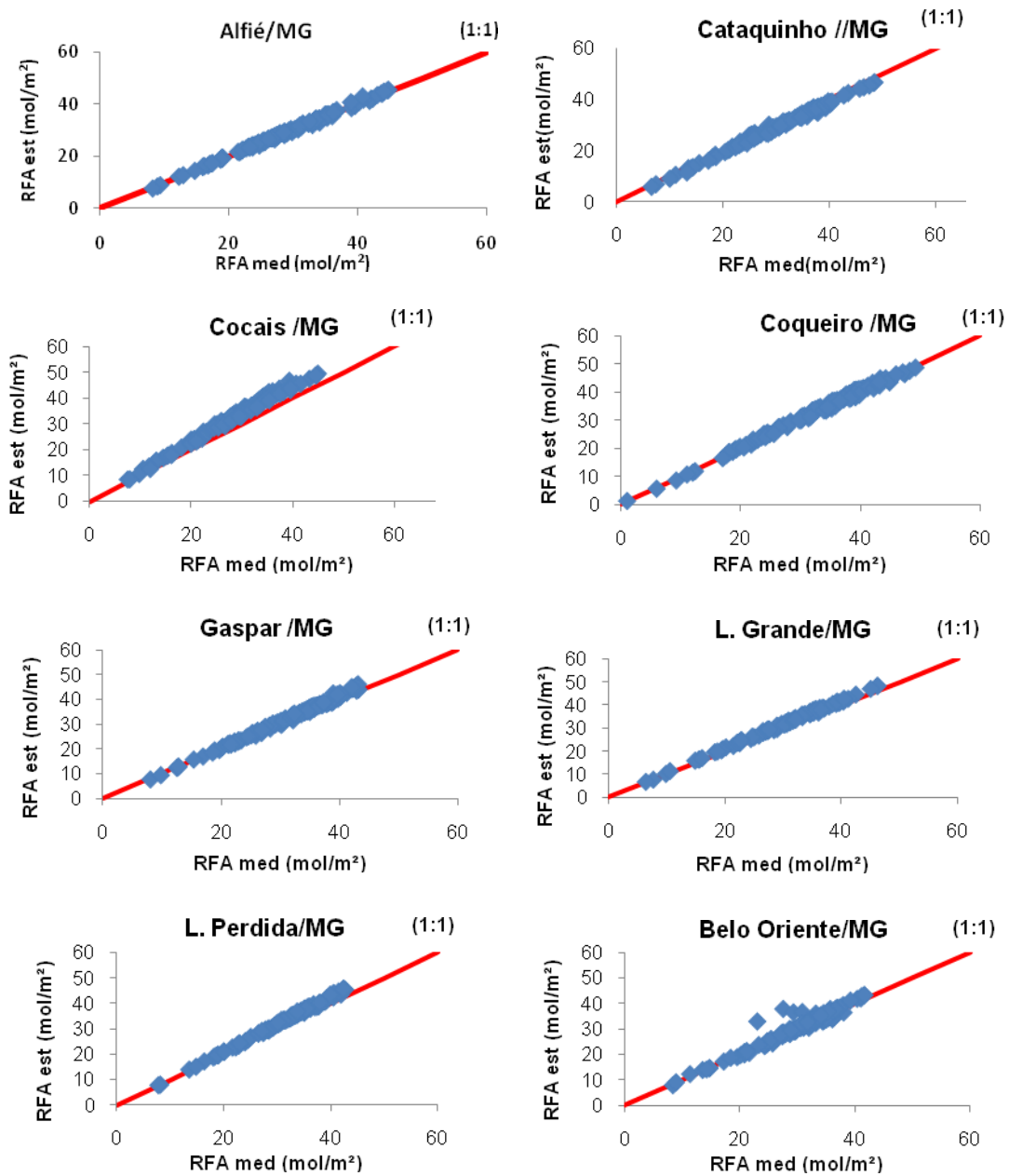


Figura 26 – Relação entre a RFA medida e a RFA estimada pelos modelos para o período seco considerando os dados referentes ao ano de 2007, na bacia do rio Doce.

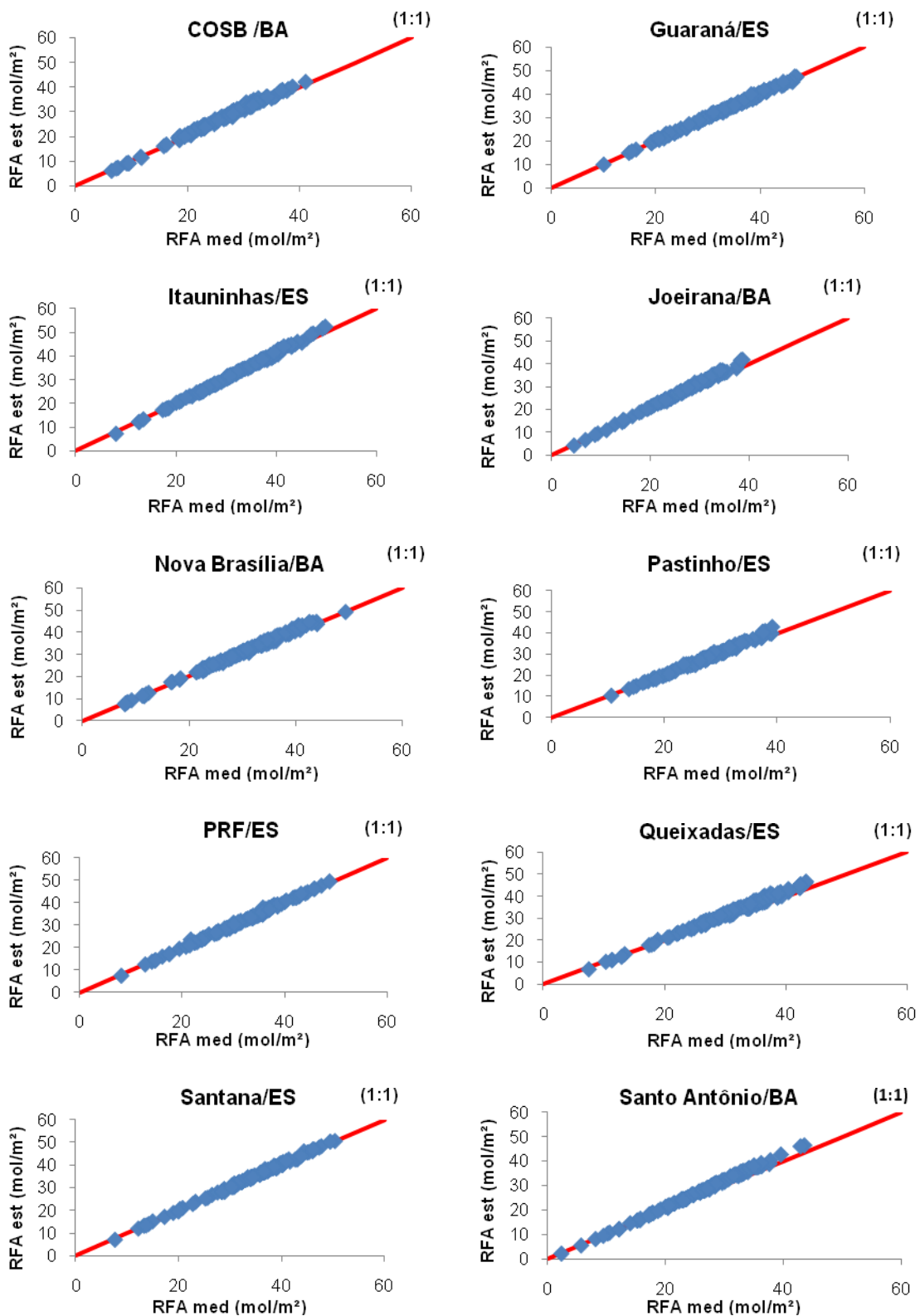


Figura 27 – Relação entre a RFA medida e a RFA estimada pelos modelos para o período seco considerando os dados referentes ao ano de 2007, nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha.

As espacializações apresentadas nas Figuras 28 e 29 relacionam os valores medidos no ano de 2007 com valores estimados em partição anual e sazonal nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha. Na maioria das localidades os modelos apresentaram uma superestimação, sendo a RFA no período chuvoso maior do que no período seco, resultados compatíveis aos encontrados com os valores medidos.

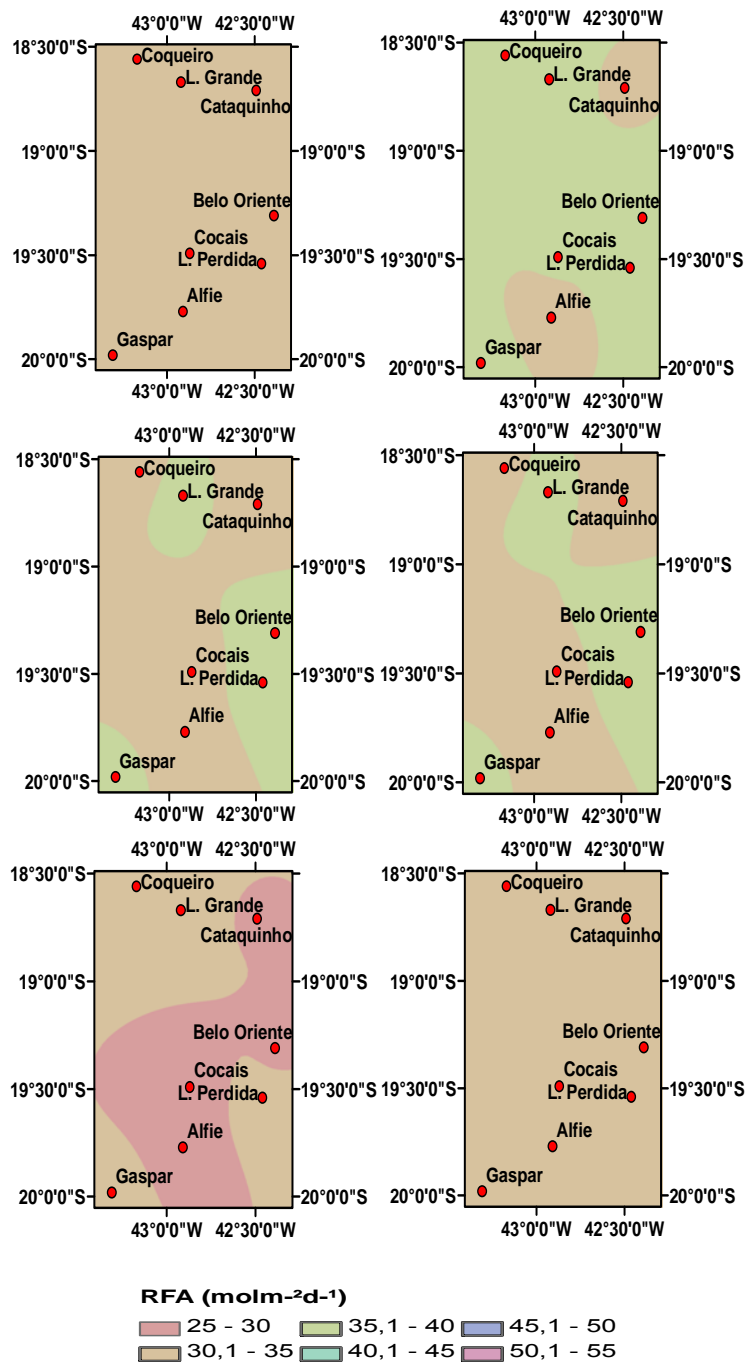


Figura 28 - Média da RFA medida e estimada no ano de 2007, nos períodos geral, chuvosos e secos nas localidades da bacia do rio Doce (MG).

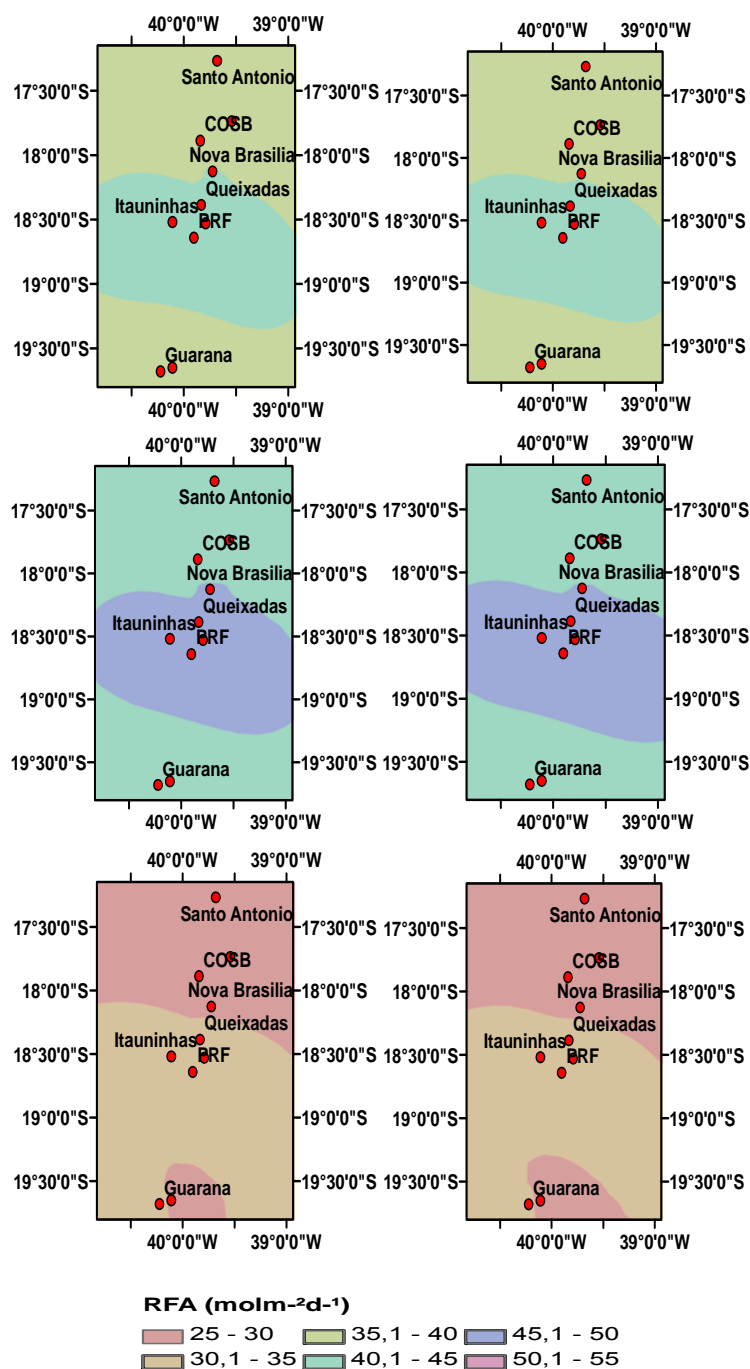


Figura 29 - Média da RFA medida e estimada no ano de 2007, nos períodos geral, chuvosos e secos nas localidades das bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha (ES e BA).

4.6.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA

As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam os Indicativos estatísticos determinados a partir dos valores de RFA medidos e estimados, considerando o ano de 2007

(anual e sazonal) para as 18 estações meteorológicas, situadas nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha. Os modelos em partição anual e sazonal fornecem valores negativos (subestimativa) e positivos (superestimativa), com predominância dos positivos. Em termos percentuais absolutos de MBE, os modelos que obtiveram os melhores desempenhos foram os da partição sazonal chuvoso, variando entre -0,96 a 2,85 %, com desempenho intermediário os da partição anual, variando entre 0,22 a 3,05 %, com o pior desempenho os da partição sazonal seco, variando entre -0,01 a 4,81 %. Quanto ao RMSE os modelos em partição sazonal, tem os melhores desempenho, variando de 0,62 a 5,05 %; enquanto que o pior desempenho foi encontrado na partição anual, variando de 0,89 a 3,72 %. Os valores obtidos para o índice de concordância de Wilmott foram elevados e próximos de 1, variando de 0,94 a 1,00, sendo os melhores resultados encontrados para a partição sazonal.

Tabela 4. Indicativos estatísticos determinados a partir dos valores de RFA medidos e estimados, considerando o **ano de 2007 (geral)** para as 18 estações meteorológicas, situadas nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha.

Estações	RMSE (molm⁻²d⁻¹)	MBE (molm⁻²d⁻¹)	d	SEE (molm⁻²d⁻¹)
Alfié	1,554	0,220	0,995	2,413
Cataquinho	1,582	0,291	0,995	2,502
Cocais	3,722	3,049	0,980	13,857
Coqueiro	1,091	0,586	0,997	1,191
Gaspar	3,100	1,913	0,990	9,610
Lagoa Grande	1,323	0,579	0,996	1,751
Lagoa Perdida	1,906	1,472	0,998	3,631
Belo Oriente	2,752	2,351	0,988	7,575
COSB	1,488	0,955	0,998	2,214
Guaraná	0,982	0,436	1,000	0,964
Itauninhas	1,495	0,874	0,999	2,236
Joeirana	2,355	2,044	0,988	5,546
Nova Brasília	1,244	0,401	0,999	1,548
Pastinho	1,506	1,140	0,999	2,268
PRF	1,307	0,550	0,999	1,708
Queixadas	2,315	2,028	0,995	5,359

Tabela 4. Continuação

Estações	RMSE (molm⁻²d⁻¹)	MBE (molm⁻²d⁻¹)	d	SEE (molm⁻²d⁻¹)
Santana	0,868	0,463	0,999	0,754
Santo Antônio	2,265	1,952	0,996	5,131
Média	1,765	1,123	0,995	3,662

Tabela 5. Indicativos estatísticos determinados a partir dos valores de RFA medidos e estimados, considerando o **período chuvoso** do ano de 2007 para as 18 estações meteorológicas, situadas nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha.

Estações	RMSE (molm⁻²d⁻¹)	MBE (molm⁻²d⁻¹)	d	SEE (molm⁻²d⁻¹)
Alfié	1,450	-0,964	0,997	2,103
Cataquinho	0,657	-0,057	0,999	0,432
Cocais	2,079	1,105	0,995	4,321
Coqueiro	1,068	0,189	0,997	1,140
Gaspar	4,634	2,852	0,976	21,471
Lagoa Grande	1,147	-0,484	0,998	1,315
Lagoa Perdida	1,646	0,682	0,996	2,710
Belo Oriente	3,099	2,326	0,988	9,604
COSB	1,961	1,118	0,994	3,846
Guaraná	1,186	0,577	0,999	1,406
Itauninhas	1,497	0,427	0,998	2,241
Joeirana	2,544	2,134	0,991	6,470
Nova Brasília	1,123	-0,393	0,999	1,261
Pastinho	1,121	0,698	0,999	1,256
PRF	1,223	0,009	0,999	1,495
Queixadas	2,167	1,832	0,993	4,694
Santana	0,840	0,148	0,999	0,705
Santo Antônio	2,358	1,790	0,992	5,559
Média	1,733	0,746	0,995	3,807

Tabela 6. Indicativos estatísticos determinados a partir dos valores de RFA medidos e estimados, considerando o **período seco** do ano de 2007 para as 18 estações meteorológicas, situadas nas bacias dos rios Doce, São Mateus e Jequitinhonha.

Estações	RMSE (molm⁻²d⁻¹)	MBE (molm⁻²d⁻¹)	d	SEE (molm⁻²d⁻¹)
Alfié	1,075	0,895	0,997	1,155
Cataquinho	0,981	-0,064	0,998	0,962
Cocais	5,053	4,812	0,939	5,530
Coqueiro	1,354	1,096	0,995	1,834
Gaspar	2,062	1,020	0,997	4,253
Lagoa Grande	1,377	1,158	0,993	1,895
Lagoa Perdida	2,052	1,950	0,996	4,209
Belo Oriente	2,472	2,323	0,977	6,113
COSB	1,421	1,220	0,999	2,018
Guaraná	0,624	0,306	1,000	0,390
Itauninhas	1,500	1,276	0,999	2,249
Joeirana	2,037	1,879	0,990	4,150
Nova Brasília	1,245	1,041	1,000	1,551
Pastinho	1,873	1,637	0,999	3,509
PRF	0,966	0,759	1,000	0,933
Queixadas	2,445	2,231	0,997	5,979
Santana	0,922	0,783	1,000	0,849
Santo Antônio	2,458	2,262	0,997	6,039
Média	1,696	1,410	0,994	3,785

5. CONCLUSÕES

A radiação solar global e a radiação fotossinteticamente ativa variam em partição anual, sazonal e espacial.

Em termos percentual, a relação RFA pela R_g não é constante, variando de 43% a 50 %.

A relação RFA pela R_g variou com a precipitação ao longo dos anos, e de maneira geral, constatou-se que as relações apresentaram tendências de serem superiores nos períodos chuvosos comparativamente aos períodos secos.

Os modelos obtidos com partição sazonal são ligeiramente melhores dos que os modelos com partição anual.

Através dos erros estatísticos conclui-se que os modelos estão bem ajustados; e que a modelagem da radiação fotossinteticamente ativa pode ser utilizada com boa precisão, mesmo sendo a radiação global a única variável de entrada dos modelos.

A modelagem da radiação fotossinteticamente ativa em função da radiação global pode ser utilizada para estimar a RFA, sendo uma técnica confiável e de baixo custo.

Os modelos apresentados tem aplicabilidade somente nas regiões de estudo, podendo ser calibrado para qualquer região.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKERLY, D.D.; BAZZAZ, F.A. Seedling crown orientation and interception of diffuse radiation in tropical forest gaps. *Ecology*, New York, v. 76, p. 1134-1146, 1995.
- ALADOS, I., ALADOS-ARBOLEDAS, L. Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.93, p.27-28, 1999.
- ALADOS, I.; FOYO-MORENO, I.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. Photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*. Amsterdam, v.78, p.121-131, 1996.
- ALADOS, I; OLMO, F.J.; FOYO-MORENO, I.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. Estimation of photosynthetically active radiation under cloudy conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 102 (2000) 39–50.
- ASSIS, F. N.; MENDEZ, M. E. G. Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. *Pesquisa agropecuária brasileira*. v.24, p.797-800, 1989.
- ASSUNÇÃO, H. F.; ESCOBEDO, J. F.; CARNEIRO, M. A. C.; Eficiência de uso da radiação e propriedades óticas da cultura do amendoim. *Pesquisa agropecuária tropical* v. 38, n. 3, p. 215-222, jul./set. 2008.
- BAKER, K. S.; FROUIN, R. Relation between photosynthetically available radiation and total isolation at the surface under clear skies. *Limnol Oceanography*. V.32, p1370-1377,1987.
- BRITTON, C.M.; DODD, J.D. Relationships of photosynthetically active radiation and shortwave irradiance. *Agricultural Meteorology*, v. 17, p. 1-7, 1976.
- CARTER, R.E.; KLINKA, K. Variation in shade tolerance of Douglas-fir, western hemlock, and western red cedar in coastal British Columbia. *For. Ecol. Manag.*, Amsterdam, v. 55, p. 87-105, 1992.
- DALLACORT, R.; RICIERI, R.P.; SILVA, S. L.; FREITAS, P.S.L.; SILVA, F.F. Análises do comportamento de um actinógrafo bimetálico (R. Fuess-Berlin-Steglitz) em diferentes tipos de cobertura do céu. *Acta Scientiarum. Agronomy* v. 26, no. 4, p. 413-419, 2004.

- De VAULT, J.E.; KTSAROS, K.B. Remote determination of cloud liquid water path from bandwidth-limited shortwave measurements. *J. Atm. Sci.*, v. 40, p. 665-685, 1983.
- DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A. *Solar engineering of thermal processes*. New York: John Wiley & Sons, 1980. 652p.
- FINCH, D.A. et al. Photosynthetically active radiation regimes in a southern African savanna environment. *Agric.For. Meteorol.*, Amsterdam, v. 122, p. 229-238, 2004.
- FEITOSA, J.R.P.; FERREIRA DA COSTA, R.; FISCH, G.; SOUZA, S. S. de e NOBRE, C. A. Radiação solar global em áreas de floresta e pastagem na Amazônia. *REVISTA BRASILEIRA DE AGROMETEOROLOGIA* (no prelo), 1998.
- FONSECA, E. L.; SILVEIRA, V. C. P.; SALOMONI, E. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa incidente em biomassa aérea da vegetação campestre natural no bioma Campos Sulinos do Brasil. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.36, n.2, p.656-659, mar - abr, 2006.
- FRANÇA, S.; ROSA, L.M.G.; BERGAMASCHI, H.; NABINGER, C.; SPANENBERG, P. Radiação fotossinteticamente ativa e sua relação com a radiação solar global em dossel de alfafa, em função do índice de área foliar. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. v.5, n.2, p. 147-153, 1997.
- FRISINA, V. A.; GOMES, E.N.; PASQUAL, P. H.; ESCOBEDO, J. F. Estimativa da radiação fotossinteticamente ativa em função do índice de claridade, 2002.
- FRISINA, V. A. Modelagem das radiações global, difusa e fotossinteticamente ativa em ambiente protegido e suas relações com o crescimento e produtividade da cultura de pimentão (*Capsicum annum* L.). 2002. Tese (Doutorado)- Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.
- GAASTRA, P. Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbondioxide, temperature and stomatal diffusion resistance. *Meded. Landbouwhogesh. Wagening*, v59, p.1-68, 1959.

- GOMES, E. N.; Medidas e modelos de estimativa da radiação direta na incidência – Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, p. 8-9, 2006.
- GOMES, E. N.; ESCOBEDO, J.F.; Modelos de estimativa da radiação fotossinteticamente ativa global e difusa da radiação de ondas curtas e do índice de claridade. Irriga, Botucatu, v. 7, n. 2, 2002.
- GRIMM, A.M., Meteorologia Básica – Notas de Aula. Primeira versão eletrônica - setembro 1999. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>> Acesso em: 12 jun. 2007.
- HALL, D. O.; RAO, K. K.; Photosynthesis. Ed. Edward Arnold Publishers , Ltd. Inglaterra. p. 1- 58, 1978.
- HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; DIDONET, A. D.; TRINDADE, M. G.; SOARES, B. B.; MOREIRA, J. A. A.; CÁNOVAS, A. D.; Eficiência de uso da radiação solar na produtividade do trigo decorrente da adubação nitrogenada. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.10, n.2, p.352–356, 2006.
- HOFFMANN, R.; VIEIRA , S. Análise de regressão, uma introdução à econometria. São Paulo: Hucitec. 379p, 1998.
- HOWELL, T. A.; MEEK, D. W. Relationship of Photosynthetically Active Radiation to Shortwave Radiation in the San Joaquin Valley. Agricultural Meteorology. V.28, p. 157-175, 1983.
- IQBAL, M. An introduction to solar radiation. New York: Academic Press, 1983.
- KARALIS, J. D. Characteristics of direct photosynthetically active radiation . Agricultural and Forest Meteorology., v.48, p.225-234, 1989.
- LI-COR INSTRUMENTS. Radiation measurement instruments; Radiometers ,PAR sensors, Dataloggers, Spectroradiometers, Photometers. Lincoln, 24p. (catálogo), 1991.
- LUTGENS, F.K. e E.J. TARBUCK, The Atmosphere: an introduction to Meteorology. Prentice Hall, 1989.
- MARTINI, T. N.; NETO, D. D.; STORCK, L.; BURAUÉ, P.; SANTOS, E. A.; Regiões homogêneas e tamanho de amostra para atributos do clima no Estado de São Paulo, Brasil. Ciência Rural, Santa Maria, v.38, n.3, p.690-697, mai-jun, 2008.

- McCREE, K. J. A solarimeter for measuring photosynthetically active radiation. *Agric. Meteorol.* 3:352-363, 1966.
- MEZA, F., VARAS, E. Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology.* v.100, p. 231–241. 2000.
- MOONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9, 747-766, 1972.
- MOON, P. Proposed solar-radiation curves for engineering use. *J. Franklin Inst.*, 230, 583-618. 1940.
- MOTA, F. S. *Meteorologia Agrícola.* São Paulo: Nobel. p. 63-141, 1985.
- MÖTTUS, M.; ROSS, J.; SULEV, M. Experimental study of ratio of PAR to direct integral solar radiation under cloudless conditions. *Agricultural and Forest Meteorology.* 109 (2001) 161–170.
- OLIVEIRA, A. S.; GAIO, D. C.; WYREPkowski, C. C.; CAMPELO, J. H.; LOBO, F. A.; NOGUEIRA, J. S.; SANCHES, S.; PALÚ, A. E. R.; RODRIGUES, V. Eficiência de utilização da radiação fotossinteticamente ativa na produção de matéria seca de uma pastagem mista no cerrado de Mato Grosso. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Piracicaba, v.15, n.3, p.299-303, 2007.
- PAPAIoANNOU, G.; PAPANIKOLAOU, N.; RETAILS, D. Relationships of photosynthetically active radiation and shortwave radiation. *Theor. Appl. Climatol.* V.48, p.23-27, 1996.
- PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P.C. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações.* Guaíba: Agropecuária. 478p, 2002.
- PEREIRA, A. R., VRIS MAN, A. L., GAL VANI, E. Estimativa da Radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo. *Scientia Agrícola.* v. 59, p.211-216. abr./jun. 2002.
- RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. *Biology of Plants*, sixth edition. Ed. W. H. Freeman and company, New York, E.U.A. p. 125-151, 1999.
- ROSS, J., SULEV, M. Sources of errors in measurements of PPAR. *Agricultural and Forest Meteorology.* v. 100, p. 103-125. 2000.

- RUBIO, M. A.; LOPEZ, G.; TOVAR, J.; POZO, D.; BATLLES, F.J. The use of satellite measurements to estimate photosynthetically active radiation. *Physics and Chemistry of the Earth* 30 (2005) 159–164.
- SILVA, R.B.C; SILVA, R. M; COSTA, J. M. N; COSTA, A. C. L. Eficiência de uso da água e da radiação em um ecossistema de manguezal no estado do Pará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.21, n.3a, 104-116, 2006.
- SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T.; MANTOVANI, L. E.;SIRTOLI, A. R. A.; OKAFIORI, C.; Atributos do relevo derivados de modelos digital de elevação e suas relações com solos. *Scientia Agraria*, Curitiba, V.9, n.3, p.317-329, 2008.
- SPOLADOR, J.; SANCHES, L.; COSTA, M. Radiação fotossinteticamente ativa em uma floresta de transição cerrado-amazônica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.21, n.3b, 301-307, 2006.
- STEIDLE NETO, A. J.; RIBEIRO, A.; ZOLNIER, S.; LEITE, F. P. Variabilidade sazonal da relação entre a radiação fotossinteticamente ativa e a radiação global na bacia do rio Doce, Estado de Minas Gerais. *Acta Sci. Agron. Maringá*, v. 28, n. 3, p. 427-431, 2006.
- STEIDLE NETO, A. J.; ZOLNIER, S.; MAROUELLI, W. A.; CARRIJO, O. A. Razão entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global no cultivo do tomateiro em casa-de-vegetação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.12, n.6, p.626–631, 2008.
- SZEICZ, G. Field measurements of energy in the 0.4-0.7 micron range. *Light as an Ecological Factor*. p.41-51. Blackwell scientific Publications, Oxford.1966.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, p. 719, 2004.
- TEIXEIRA, A. H .C.; SILVA, B. B.; AZEVEDO, P.V. Estimativa do fluxo de radiação fotossinteticamente ativa, no município de Petrolina-PE, 2003.
- VAREJÃO-SILVA, M.A. 2005, *Meteorologia e climatologia*, versão digital 2. Disponível em:http://www.agritempo.gov.br/modules.php?name=Downloads&d_op=viewdownload&cid=19. Acesso em: 17 Mar. 2010.
- VIANELO, R. L.; ALVES, A. R.; *Meteorologia básica e aplicações*. Imprensa Universitária UFV, 1991.

WHATLEY, J.M.; WHATLEY, F. R. Light and Plant Life. Inghilterra. Edward Arnold Publishers Ltd. p. 1 -101, 1980.

WEISS, A.; NORMAN, J. M. Partitioning solar radiation into direct and diffuse, visible and near-infrared components, Agricultural e Forest Meteorology, pag. 205-213, 1985.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. Journal of Geophysical Research Oceans, Washington, n.90, p.8995-9005, 1985.

YAVORSKY, B. and DETLAF, A.: **Handbook of Physics**. Mir, 964pp, 1972.

7. ANEXOS

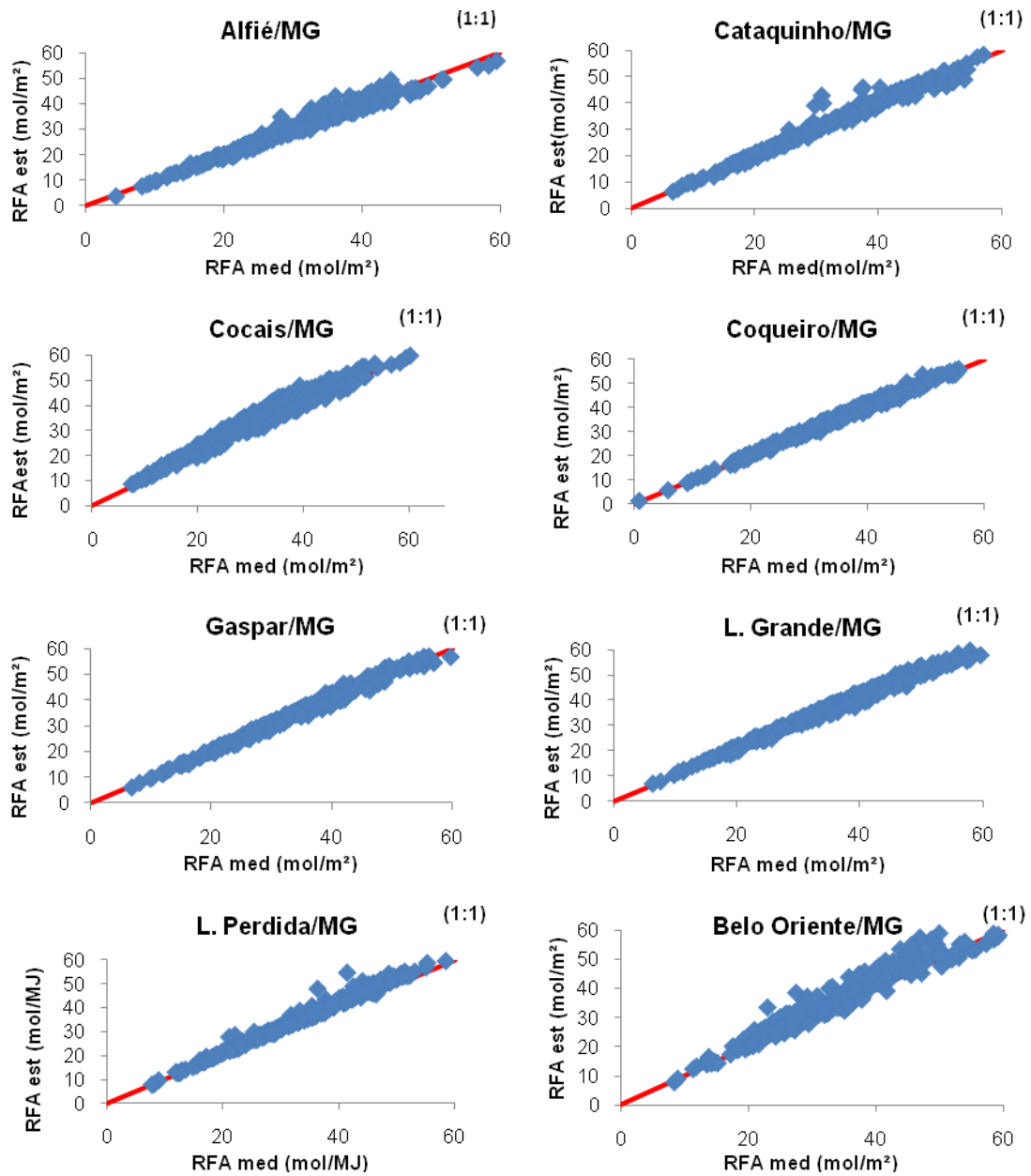


Figura 31 – Regressão simples ajustada para a RFA estimada em função da medida para a partição anual do ano 2007 para a bacia do rio Doce.

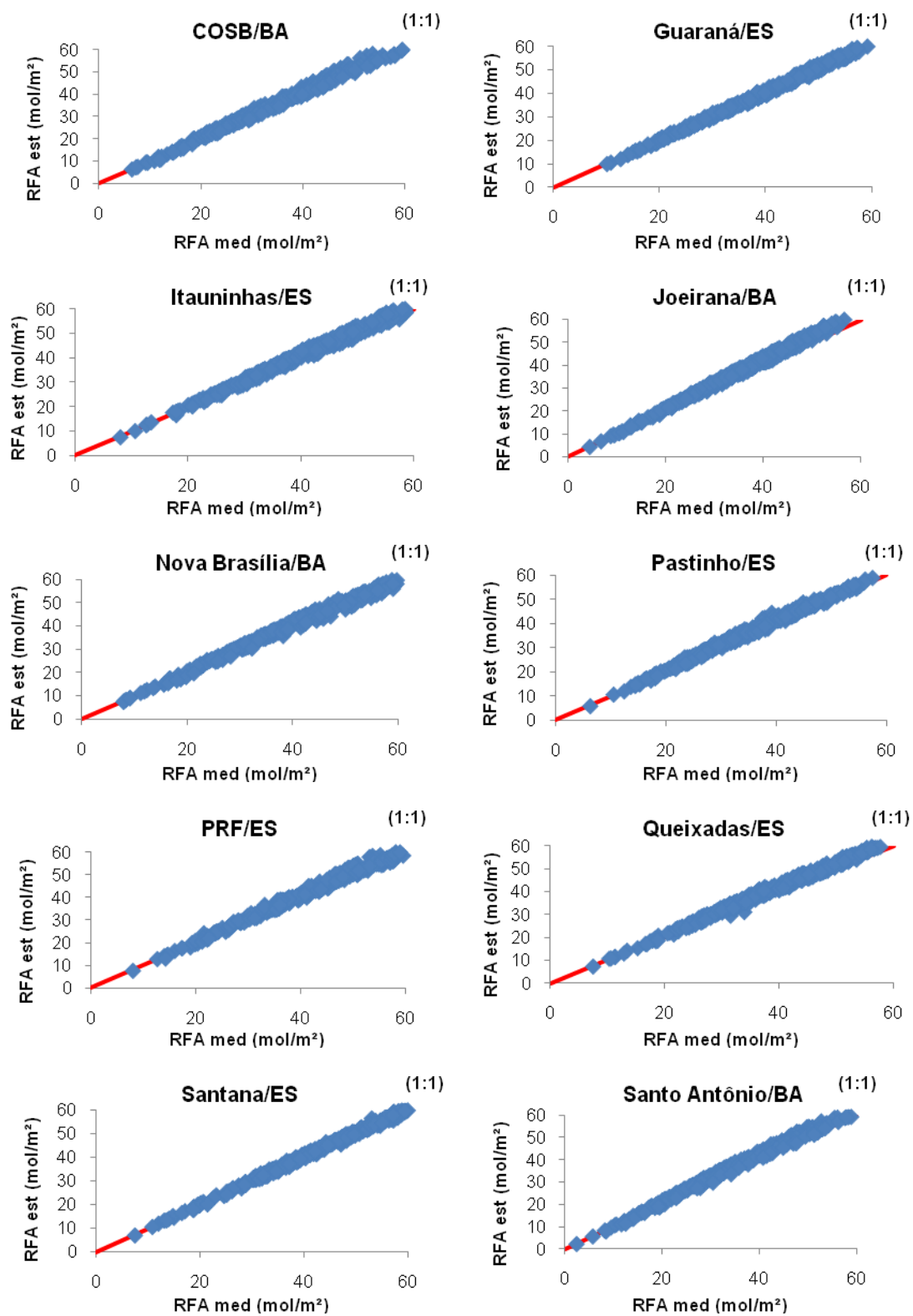


Figura 32 – Regressão simples ajustada para a RFA estimada em função da medida para a partição anual do ano 2007 para as bacias do rio Doce, rio São Mateus e Jequitinhonha (ES e BA).