

UNIVAP
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

**ESTUDO DAS IMPLICAÇÕES DA RELAÇÃO SOL-CLIMA
TERRESTRE EM PROJETOS DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

WILLIAMARY PORTUGAL¹
ALESSANDRA ABE PACINI², SERGIO PILLING³

1 – Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária

2 – Professor Orientador

3 – Professor Co-Orientador

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

2012

ESTUDO DAS IMPLICAÇÕES DA RELAÇÃO SOL-CLIMA TERRESTRE EM PROJETOS DE ENGENHARIA AMBIENTAL

WILLIAMARY PORTUGAL¹
ALESSANDRA ABE PACINI², SERGIO PILLING³

1 – Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária

2 – Professor Orientador

3 – Professor Co-Orientador

RESUMO: Este trabalho reúne algumas evidências científicas sobre a relação entre o Sol, o fluxo de raios-cósmicos galácticos incidentes na Terra e o clima do planeta com o objetivo de apresentar a ideia corrente sobre a influência dos raios-cósmicos em toda a dinâmica climática. Com esse intuito foi feita uma estimativa do impacto da variabilidade solar/raios cósmicos/média de nuvens baixas no clima terrestre através do balanço radiativo e consequentemente das alterações climáticas do planeta, além de discutirmos suas prováveis consequências em ambientes críticos. Por meio de um levantamento bibliográfico sobre as mudanças do clima ao longo de alguns ciclos solares até o atual foi proposta uma reflexão sobre a relevância de um conhecimento mais complexo da relação Sol-Clima terrestre na atuação de um Engenheiro Ambiental, para aplicação de projetos mais eficazes de prevenção ou minimização do impacto negativo em ambientes vulneráveis a eventos climáticos extremos.

PALAVRAS-CHAVE: relação Sol-Terra; raios cósmicos; mudança climática; climatologia; projeto de engenharia ambiental.

ABSTRACT: This work bring together some scientific evidences about the relation among the Sun, galactic cosmic rays incidents on the Earth and the terrestrial climate with the goal present the idea about the influence of the cosmic rays in all climate dynamic. With this aim one estimate was done of the variability solar/cosmic rays/average low clouds by the radioactive balance and consequently climatic alterations of the planet, also we discuss probable consequences them in critical environments. Per mean of a literature review about climate changes for some Sun cycles until the current, a reflection about the importance of knowledge more complex of the relation terrestrial Sun-climate on the performance of the environmental engineer was proposed, to application of more effectives prevention or

minimization projects of negative impacts in vulnerable environments at extreme weather events.

KEYWORDS: relation Sun-Earth; cosmic rays; climate change; climatology; environmental engineering project.

INTRODUÇÃO

Neste trabalho foi feito o levantamento de algumas evidências recentes do vínculo entre a atividade solar, os raios cósmicos e a média de nuvens baixas na variação climática da Terra. As discussões levantadas sobre o impacto dessa interação e suas implicações em projetos ambientais envolvem conceitos de engenharia, ciências ambientais, climatologia, geofísica, física espacial e astronomia. Isso propõe uma reflexão mais sistêmica na elaboração de projetos de Engenharia Ambiental, junto a estimativas de condições extremas condicionadas pelos efeitos dos ciclos solares no clima terrestre.

Para uma melhor compreensão sobre cada um desses fatores, faremos nessa seção uma explanação sobre os forçantes climáticos, os possíveis efeitos da atividade solar no clima da Terra e as alterações no clima em várias escalas de tempo. Na seção Materiais e Métodos serão apresentados detalhes da metodologia empregada para a elaboração do trabalho. Uma descrição do panorama histórico sobre o clima terrestre no holoceno, a apresentação e análise dos resultados da estimativa do impacto da variabilidade solar/raios cósmicos sobre o balanço radiativo do planeta e uma discussão sobre a aplicação dessa ferramenta em projetos de Engenharia podem ser vistos na seção resultado e discussão. Por fim, são apresentadas as principais conclusões.

Forçantes Climáticos

Em 2007, um estudo sobre as mudanças climáticas realizado por mais de 2500 pesquisadores, de 130 países, foi apresentado pelo IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), gerando uma comoção mundial. Neste relatório, os gases efeito estufa liberados com as atividades antrópicas foram considerados os principais causadores das mudanças climáticas observadas recentemente e da catástrofe ambiental prevista para o próximo século. A variabilidade da radiação solar (que ocorre periodicamente de acordo com a atividade magnética da estrela) foi o único forçante natural considerado neste trabalho, e ainda, com uma contribuição muito baixa para a

mudança do clima da Terra. A desconsideração da possível contribuição de outros forçantes naturais como erupções vulcânicas, entrada de partículas no sistema terrestre e variações geomagnéticas na elaboração dos cenários climáticos futuros pelo IPCC 2007 tornou o relatório cada vez mais inconsistente perante novos resultados científicos apresentados à sociedade. Isso fez com que um novo documento fosse publicado em 2010 reportando as deficiências das previsões apresentadas [1]. Por isso, a nova versão do relatório, que será publicada em 2013, basear-se-á em novos resultados científicos, com a inclusão de pesquisadores sobre a relação Sol-Terra neste grupo de trabalho.

Sabe-se que a caracterização do clima terrestre/global é altamente complexa e depende tanto de forçantes antrópicos, quanto de forçantes naturais. Em escalas de tempo muito longas, fatores orbitais como as oscilações periódicas da precessão, obliquidade e excentricidade (descritas pelos ciclos orbitais conhecidos como ciclos de Milankovitch), justificam as variações climáticas bruscas sofridas pelo planeta entre os glaciais e interglaciais [2]. O efeito da precessão possui um período na ordem de 22 mil anos e está 180° fora de fase entre os hemisférios norte e sul, sendo maior no equador, diminuindo em direção aos polos. A obliquidade é o efeito de variação entre 22° e $24,5^{\circ}$ da inclinação do eixo da Terra em relação à normal no plano da órbita, com um período médio de cerca de 41 mil anos, modulando a sazonalidade, principalmente nas altas latitudes. A excentricidade modula o movimento da Terra em torno do Sol, variando a órbita entre mais elíptica e mais circular com uma periodicidade de 100 mil anos na média e componentes importantes em 95, 123 e 136 mil anos [3]. Tais mudanças são responsáveis pela variação da radiação solar incidente no topo da atmosfera, controlando a temperatura na baixa atmosfera. Atualmente encontramos-nos em um período interglacial, denominado Holoceno, que se caracteriza por um intervalo com temperaturas mais elevadas que separa os períodos glaciais.

A consideração de fatores de origem extraterrestre, que englobam os ciclos de atividade magnética do Sol e as variações do fluxo incidente de raios-cósmicos na atmosfera do planeta como forçantes climáticos, é recente. “O clima da Terra é uma manifestação de como a radiação solar é absorvida, redistribuída pela atmosfera e oceanos e eventualmente re-irradiada para o espaço” [4]. Embora os processos meteorológicos ocorram apenas na Troposfera, a dinâmica climática envolve todas as demais camadas atmosféricas, que de acordo com a estratificação térmica (Figura 1) são classificadas em:

- Troposfera: camada que varia de espessura de acordo com a latitude e o tempo. Pode alcançar uma altitude em torno de 16,5 Km. Nos polos possui 8,5 Km e em latitudes menores

alcança aproximadamente 10,5 Km. É a camada que possui importância fundamental, pois é nela que se desenvolvem todos os processos climáticos/meteorológicos que regem a vida no planeta;

- Estratosfera: camada acima da troposfera, rica em ozônio (O_3), que absorve os raios ultravioletas impedindo a chegada de um fluxo muito intenso na superfície;

- Mesosfera: camada acima da estratosfera, que devido ao forte decréscimo térmico possui a menor temperatura da atmosfera (em torno de $-90^{\circ}C$);

- Termosfera: nessa camada ocorre novamente acréscimo da temperatura devido à absorção de raios-x incidentes na atmosfera, pelo oxigênio molecular (O_2) [5].

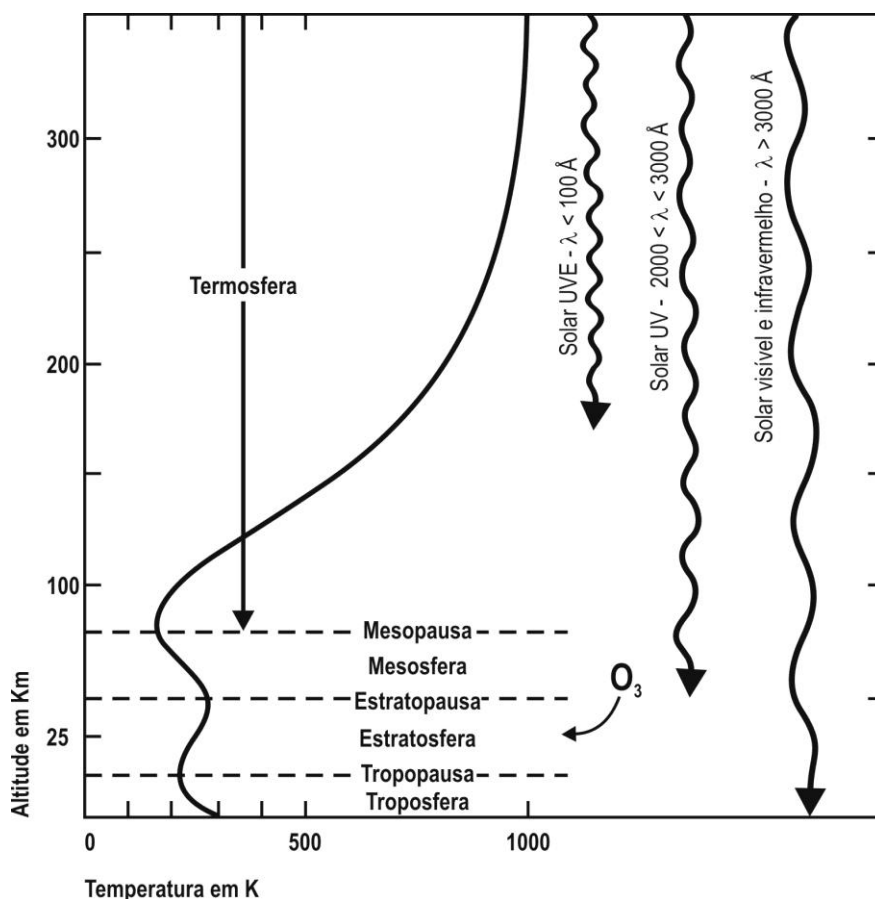


Figura 1 – Camadas atmosféricas relacionadas à temperatura [6].

Possíveis Efeitos da Atividade Solar no Clima da Terra

Impressões da atividade solar no clima terrestre em períodos mais curtos apontam para três maiores fenômenos como os principais responsáveis por essa relação (Tabela 1): o fluxo espectral ultravioleta (UV), a irradiância solar total (IRR) e a modulação dos Raios Cósmicos (RC), causada pela variabilidade do vento solar em relação ao ciclo de atividade do Sol [7].

A relação do fluxo espectral ultravioleta (UV) com as mudanças climáticas tem gerado controvérsias, sendo que ainda não existe um consenso a respeito de um acoplamento físico entre a estratosfera e a troposfera [8]. O espectro UV varia pouco durante o ciclo solar e é geralmente absorvido pelo ozônio (O₃) estratosférico, produzindo um aquecimento e conduzindo o balanço dessa molécula na estratosfera. Esses efeitos têm sido associados às mudanças dos ventos troposféricos, que são parâmetros de controle das condições climáticas na superfície da Terra. A Irradiância Solar Total (IRR), considerada como o total de energia eletromagnética do Sol, possui uma variação cíclica de 11 anos, com amplitude em torno de 0,1% [9]. Porcentagem esta, que não seria capaz de produzir significantes mudanças climáticas no planeta [10]. Mas, já as variações em torno de 0,6% poderiam justificar abruptas mudanças na temperatura da Terra, como a que ocorreu durante a pequena era do gelo [11]. Além disso, existem alguns possíveis processos capazes de amplificar essa pequena variabilidade do ciclo solar e produzir alguns efeitos na troposfera como o causado pelos RC na cobertura de nuvens e nas mudanças do circuito elétrico atmosférico, que também favorece a formação de nuvens, neste caso de tempestades, por meio da ionização do ar na troposfera e na estratosfera [12]. Segundo esses mesmos autores, a cobertura de nuvens é considerada o fator principal para as mudanças climáticas na Terra.

Tabela 1: Possíveis agentes da relação entre a atividade solar e o clima terrestre [13].

Forçantes	Consequências Climáticas
Fluxo Espectral Ultravioleta (UV)	Aquecimento da média/baixa estratosfera, dinamicamente ligada à troposfera. Modificação na composição química da média e baixa atmosfera.
Irradiância Solar Total (IRR)	Impacto direto na superfície dos oceanos e no ciclo hidrológico.
Modulação de Raios Cósmicos (RC)	Impacto na composição, temperatura e ionização de diferentes camadas atmosféricas, alterando seu campo elétrico e modulando a produção de núcleos de condensação.

Originários de supernovas e de outras estrelas supermassivas, como as de nêutrons, os raios cósmicos são partículas carregadas com um espectro que varia de alguns MeV até acima de 10^{21} eV de energia [14]. Podem ser divididos em: *Raios Cósmicos Primários*, originários do centro da galáxia (Raios Cósmicos Galácticos - GCR “Galactic Cosmic Rays”), do Sol (Raios Cósmicos Solares – SCR “Solar Cosmic Rays”) e da Heliosfera, bolha de plasma magnetizada que cerca o sol e inclui as órbitas de todos os planetas estendendo-se até o meio interestelar da Via Láctea [15]; e *Raios Cósmicos secundários*, que são produtos da interação entre os primários com a atmosfera terrestre [14]. Essas partículas afetam as condições físico-química da atmosfera podendo influenciar no sistema de absorção e reflexão da radiação solar [16], pois, atuam como os principais agentes ionizantes de compostos voláteis, que se tornam núcleos de condensação, fundamentais para a geração de nuvens. Isso acontece devido o aumento significativo dos aerossóis quando em interação com os raios cósmicos [17]. Os autores mencionam ainda, que modelos matemáticos sugerem que quase a metade da condensação global das nuvens na baixa atmosfera podem ser provenientes da nucleação dos aerossóis.

Considerando que os raios cósmicos também afetam o circuito elétrico global atmosférico, a quantidade de partículas ionizadas na atmosfera pode aumentar e incidir sobre a formação de nuvens carregadas. A taxa de ionização depende inversamente da atividade solar. Dessa forma, estando o sol em período de maior atividade (aumento das manchas solares), a concentração de íons produzidos será menor, devido à modulação dos raios cósmicos pelo vento solar. O contrário ocorre quando o sol encontra-se no período de menor atividade (diminuição das manchas solares). Por isso, os raios cósmicos variam periodicamente e de acordo com a latitude (maior ou menor radiação solar), influenciando na taxa de formação de nuvens e consequentemente na taxa de precipitação [16].

Variações Climáticas Terrestres

Estudos e pesquisas sobre os fatores mencionados podem levar ao conhecimento da evolução do clima, auxiliando a compreensão das alterações climáticas em várias escalas de tempo. Pois, compreender a climatologia terrestre de uma maneira mais ampla e profunda é compreender melhor todos os processos que são influenciados por ela ao longo do tempo como os morfológicos, formação dos solos, crescimento e desenvolvimento dos seres vivos. Esse conhecimento sistêmico pode também dar subsídios para potencializar a consolidação de

projetos de controle, ou mesmo, de estratégias de ação para uma melhor adaptação aos impactos associados às mudanças climáticas.

O planeta, como já mencionado, tem experimentado períodos de decréscimo e aumento de temperatura ao longo da sua história, com oscilações entre uma série de episódios glaciais e interglaciais, durante os quais as geleiras continentais têm alternadamente avançado e recuado à medida que a temperatura da Terra eleva ou abaixa. O período glacial mais recente ocorreu há 10.000 anos, e desde 1850 o clima da Terra tem se esquentado. Acredita-se que a causa desse aquecimento até 1950 seja devido à combinação de vários fatores, incluindo o incremento de gases efeito estufa, pequenas atividades vulcânicas, variabilidade interna da relação atmosfera-oceano e o aumento da irradiância solar. Este último é suportado pelo período de aumento das manchas solares, em comparação ao de baixas manchas solares durante a Pequena Era do Gelo no século XVII [18]. Com isso, pode-se observar que períodos de diferenciação climática, sempre existiram ao longo do tempo, não estando relacionados a qualquer tipo de ação humana, que baixam a temperatura em até 2 graus, gerando Idades do Gelo ou que a elevam em vários graus a mais, em relação à média dos tempos modernos. Como, então, explicar esses intervalos de variações climáticas? Quais são suas causas e porque ocorrem?

Da necessidade de contextualizar as evidências científicas da relação Geoespaço-Clima Terrestre na aplicação de projetos de Engenharia Ambiental, foi proposta a realização deste estudo, a partir de uma fundamentação teórica baseada em livros e artigos científicos, permitindo uma discussão sobre os possíveis efeitos da modulação do fluxo de raios cósmicos sobre o sistema climático terrestre e suas implicações em projetos de controle ambiental.

Assim, pretende-se contribuir para uma visão mais complexa sobre os sistemas do planeta, por meio da interação Terra – Geoespaço, neste caso, especificamente, no que se refere às alterações climáticas, para que projetos de engenharia ambiental, junto à climatologia e à Física Espacial, venham tornar-se mais realistas, competentes e efetivos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Baseado em pesquisas bibliográficas, principalmente junto a artigos científicos, este trabalho buscou reunir fundamentos em diversos estudos multidisciplinares e interdisciplinares sobre as evidências de um vínculo entre os raios cósmicos e as mudanças do clima na Terra ao longo do Holoceno (últimos 10.000 anos aproximadamente).

Para tanto, inicialmente, foi feito um levantamento histórico de eventos climáticos extremos associados aos fatores em questão, por meio de uma revisão sobre o papel dos raios-cósmicos no sistema climático terrestre e sobre os efeitos da atividade solar nessa interação. Foram, então, apresentadas algumas evidências sobre a variabilidade climática terrestre durante o Holoceno, com seus ciclos naturais (que envolvem as variações das condições do Geoespaço) e os forçantes antrópicos, ambos contribuintes para tais mudanças.

Em seguida, foi realizada uma estimativa do impacto da variabilidade solar/raios cósmicos sobre o balanço radiativo do planeta. Essa análise permitiu uma reflexão sobre a importância da visão mais ampla na formação de um Engenheiro Ambiental, além da utilização desse conhecimento em projetos em áreas de risco junto a períodos mais propensos a variações climáticas bruscas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Varição Climática no Holoceno

O clima do planeta durante o presente interglacial, Holoceno (aproximadamente 10.000 anos atrás até o presente) sustentou todo o crescimento e desenvolvimento da sociedade moderna. E embora não existam medidas diretas da variabilidade do clima durante esse período, registros paleoclimáticos demonstram que as variações foram maiores e mais frequentes do que é comumente considerado [19].

A chave para o estudo sobre as mudanças do clima do planeta está centrada na magnitude, frequência e causas da variabilidade climática natural [20]. O avanço e recuo das geleiras ao longo da história são interpretados como indicadores das mudanças climáticas, como o exemplo do recuo de extensas geleiras (flutuações observadas por mais de um século) coincidentes com o aquecimento no século passado [21]. A comparação do atual recuo com as variações glaciais do Holoceno providenciam informação para o entendimento sobre a tendência natural e os impactos antrópicos na mudança do clima. Em muitas regiões as geleiras foram menores no início para o meio do Holoceno do que no fim do século XX [21].

Os períodos de maiores mudanças climáticas da superfície terrestre que ocorreram no Holoceno foram caracterizados pela Pequena Idade do Gelo (com temperaturas em torno de 0,5 a 1^oC) e pelo Período do Máximo Medieval [21]. Segundo os autores, não existe precisamente uma definição fechada sobre a duração desses dois períodos, mas, é considerado para o segundo o início em 800 DC até 1200 DC. O período de transição entre o Período do

Máximo Medieval (precedente da Pequena Idade do Gelo) e a Pequena Idade do Gelo aconteceu por volta de 1400 DC. Este intervalo foi considerado o evento de escala global de mudança climática mais rápida [19].

Comparações de registros de paleoclimas com forçantes de séries temporais sugerem que mudanças relatadas na insolação tanto com a variação da órbita da Terra quanto com a variabilidade solar têm um importante papel nas mudanças climáticas em escala global nos últimos 11.500 anos [19]. O Sol é o principal dirigente do clima na Terra, daí a necessidade de conhecer seus ciclos e impactos, pois, períodos caracterizados por falta de manchas solares (baixa atividade solar) tal como de 1645-1745 parecem coincidir com condições de clima frio [22].

O astrônomo alemão Gustav Spörer chamou a atenção em suas publicações datadas em 1887 e 1889, sobre a interrupção do curso ordinário do ciclo das manchas solares, com quase total ausência dessas, por um período de 70 anos terminando em torno do ano de 1716. Mas, foi Maunder, baseado nos artigos de Spörer, quem providenciou mais detalhes sobre esse período prolongado do mínimo das manchas solares (manchas escuras observadas no Sol, que representam a atividade solar), chamado de “Maunder Minimum”. Em seus artigos foram feitas as seguintes considerações: 1) por um período de 70 anos, aproximadamente de 1645 a 1715 não foi vista praticamente nenhuma mancha solar; 2) na primeira metade desse período (1672 – 1704) não foi observada uma única mancha solar no hemisfério norte do Sol; 3) por 60 anos, desde 1705, não mais que um grupo de mancha solar foi vista no sol por vez; 4) durante todo o período de 70 anos as poucas manchas solares observadas pertenciam às baixas latitudes do sol, com a duração de uma única rotação ou menos. O total do número de manchas solares observadas de 1645 a 1715 foram menores do que pode ser observado em um único ano de atividade sob condições normais [23].

A coincidência do prolongado mínimo solar de Maunder com o período mais frio, chamado de Pequena Idade do Gelo, foi notada por muitos pesquisadores que viram uma evidente relação entre a atividade solar (menor atividade) e a mudança de clima na Terra. Por meio da Figura 2 é possível fazer esse vínculo entre o número de manchas solares, que representam alta ou baixa atividade solar, com a variação climática no período de 1600-2000. Pode-se observar o Mínimo de Maunder entre aproximadamente 1650-1715 onde a atividade solar medida pelo número de mancha foi muito baixa, não tendo sido constatada em alguns anos.

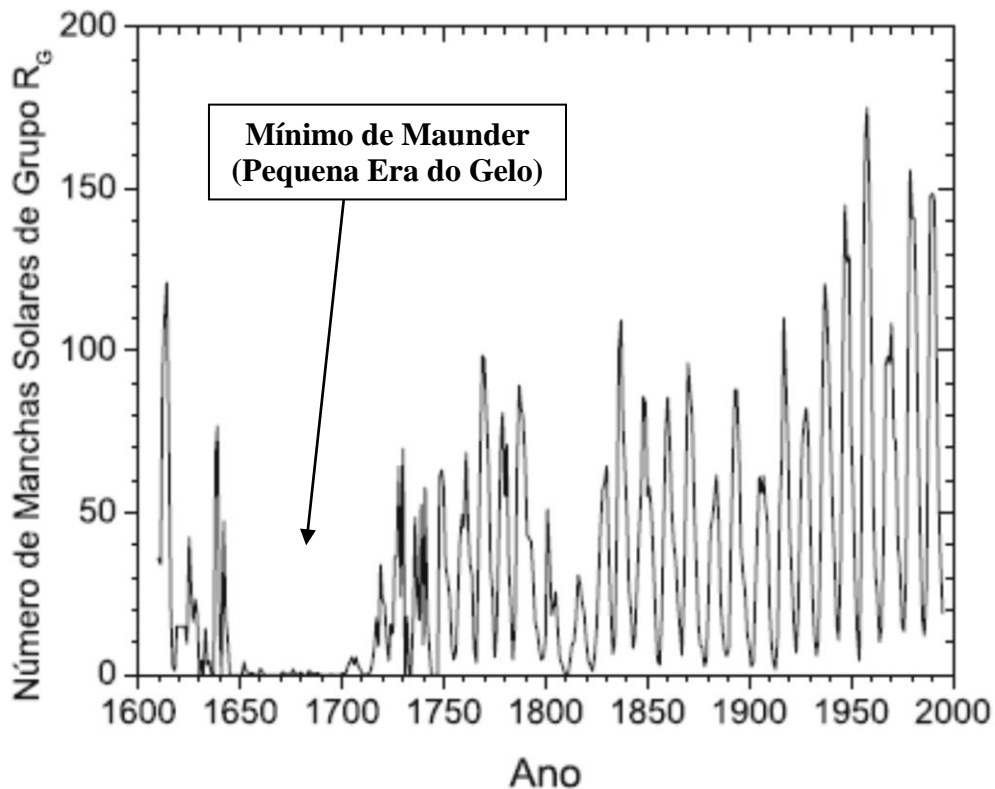


Figura 2 - Série anual do número de manchas solares de grupo para o período 1610-1995 [24].

Períodos com ciclos solares mais intensos relacionados com maior atividade da estrela em épocas com registros de aumento de temperatura na superfície terrestre, também podem ser observados na Figura 2. Acredita-se que o aquecimento da Terra desde 1850 ocorre devido à combinação de vários fatores que vêm sendo relatado neste trabalho, como a atividade vulcânica, o aumento da radiação solar, dentre outros, incluindo agora o incremento dos gases efeito estufa na atmosfera principalmente pelas atividades antrópicas [18]. Esses gases (ex. CO₂, CH₄, CFCs) absorvem a energia solar redistribuída pela superfície terrestre e re-irradiam-na novamente em direção à superfície. Com isso, muito menos calor é perdido para o espaço gerando o fenômeno de aquecimento do planeta, que é maior ou menor de acordo com a variação da irradiância solar. Após 1950 até meados de 1970 a temperatura do planeta decresce ligeiramente, mas, a partir de 1985 ocorre novamente um acréscimo considerável, o que pode ser confirmado pela variação do número de manchas solares desses períodos junto a Figura 2.

Inversamente à atividade solar apresenta-se a variação do fluxo de raios cósmicos (Figura 3), que sugere uma modulação da cobertura total de nuvens da Terra [4]. Com isso, o decréscimo desse fluxo no século XX, devido à alta atividade solar, supostamente diminuiu a formação de nuvens baixas, como mostra a Figura 3. Um possível mecanismo que explica esse processo é o efeito dos raios cósmicos como agentes ionizantes gerando íons que atuam como núcleos de condensação, afetando as condições físico-químicas da atmosfera e consequentemente a habilidade do sistema terrestre em absorver e refletir radiação solar através do aumento ou diminuição da cobertura de nuvens [16]. Pois, quando os raios cósmicos interagem com as moléculas presentes na atmosfera, estas são convertidas em íons que podem se multiplicar pela recombinação íon-íon ou pela ligação íon-aerossol, afetando o número de aerossóis que agem como núcleos de condensação na formação de nuvens. A presença de aerossóis, especialmente H_2SO_4 gasoso na atmosfera permite o crescimento de partículas sob a ação dos RC [16].

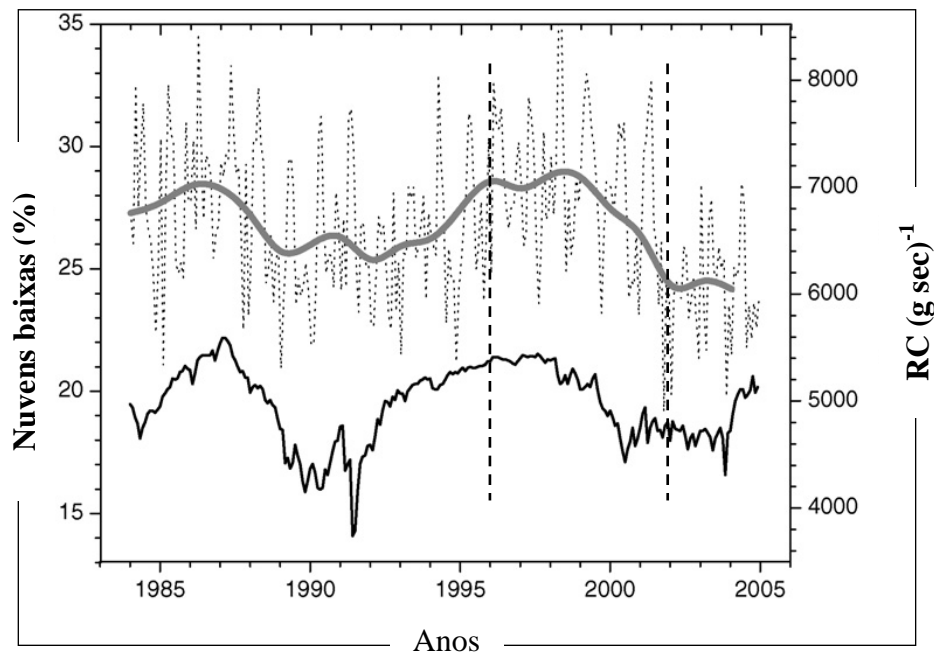


Figura 3 – Variabilidade do número de nuvens baixas (curva superior, eixo da esquerda) e ionização induzida de raios cósmicos entre 3 km de altitude (curva inferior, eixo da direita). As linhas tracejadas na vertical indicam a média anual de nuvens baixas (σ_L) e a ionização induzida de raios cósmicos para os anos de 1996 e 2002 [16].

Balço Radiativo: o impacto da atividade solar, raios cósmicos e cobertura de nuvens baixas

A atividade do Sol (representada pelo número de manchas solares, Figura 2) modula o fluxo total de radiação solar (IRR) que chega à Terra em W m^{-2} e também o fluxo de partículas de RC incidentes em g s^{-1} (Figura 3). Com isso, associando as informações das Figuras 3 e 4 é possível caracterizar um período de mínima e outro de máxima atividade, em termos desses fluxos para 1996 (Mínimo – IRR = $1.360,70 \text{ W m}^{-2}$ e RC = 5200 g s^{-1}) e para 2002 (Máximo – IRR = $1.361,80 \text{ W m}^{-2}$ e RC = 4.800 g s^{-1}), respectivamente.

Com base nos dados sobre a cobertura de nuvens da Figura 3 e da irradiância solar da Figura 4 é possível fazer uma primeira estimativa do balanço da radiação solar na superfície da Terra (τ^*) em diferentes períodos do ciclo solar, identificando a relação desses fatores entre si e suas importâncias na mudança climática do planeta.

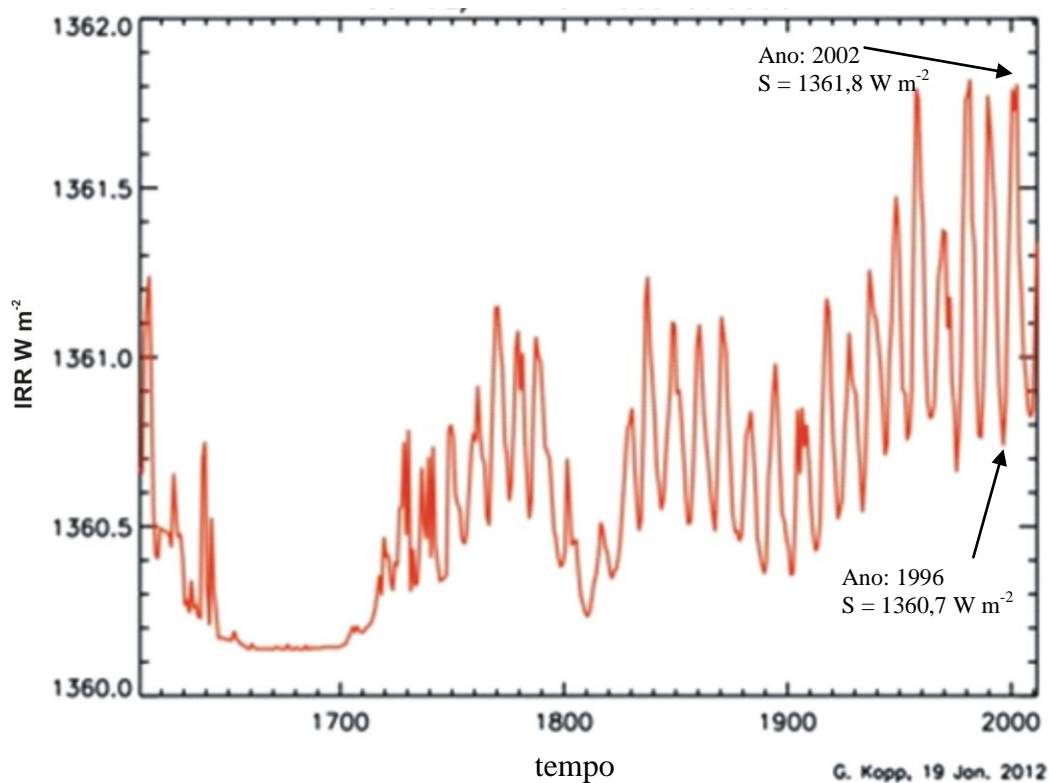


Figura 4 – Reconstrução histórica da Irradiância Solar Total (IRR). As setas indicam os picos referentes ao mínimo e máximo solar, respectivamente para os anos de 1996 e 2002, utilizados nesse trabalho para estimar o balanço de radiação [25].

O τ^* representa a quantidade de energia disponível na superfície terrestre considerando a contribuição da radiação solar que chega perpendicularmente à superfície (K_1) e que após atravessar a atmosfera tem uma parcela dessa energia refletida de volta para o espaço (K_2), além do balanço de radiação infravermelha, ondas longas, emitida pela superfície e pela atmosfera, I_1 e I_2 respectivamente, devido às suas temperaturas (Lei de Stefan – Boltzmann, onde a irradiação é proporcional à quarta potência da temperatura - $I \propto T^4$). O esquema do balanço de radiação é mostrado pela Figura 5.

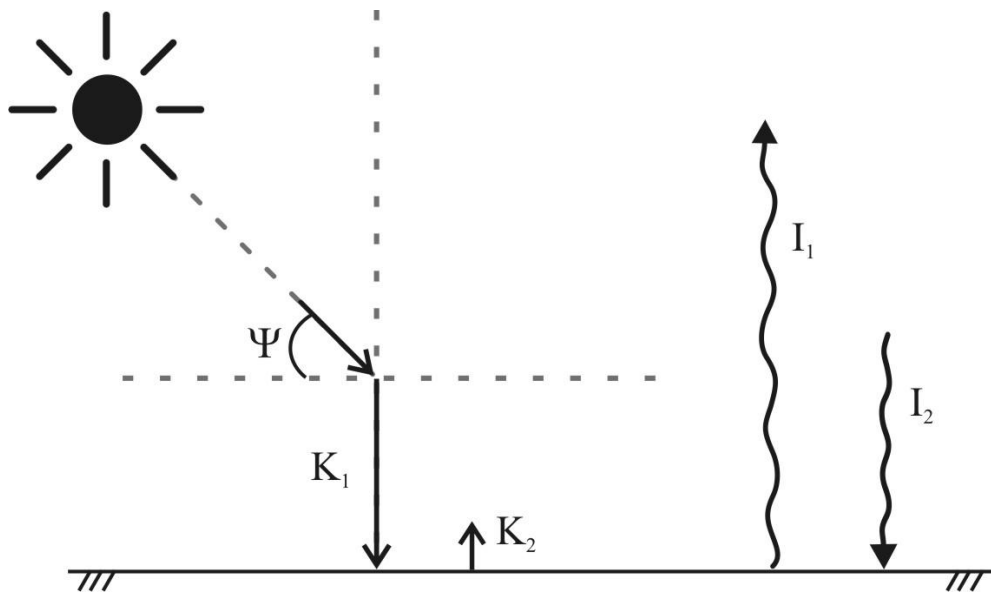


Figura 5 – Desenho esquemático do balanço radiativo.

Calculamos o balanço radiativo para os anos de 1996 e 2002 utilizando a expressão 1 [26].

$$\tau^* = K_1 + K_2 + I_1 + I_2 \quad (1)$$

sendo K_1 e K_2 expressos em $W m^{-2}$. O cálculo de cada componente é feito respectivamente por meio das expressões 2, 3, 4 e 5.

$$K_1 = -IRR \cdot T \cdot \sin(\Psi) \quad (2)$$

sendo T a transmissividade atmosférica e Ψ o ângulo referente à incidência do fluxo solar no topo da superfície (elevação). Neste trabalho consideramos um fluxo perpendicular à Terra,

sendo $\Psi = 90^0$ (região equatorial). O sinal negativo é incorporado na fórmula porque K_1 representa um fluxo de energia para baixo, ou seja, em direção à superfície. A irradiância solar no topo da atmosfera é de aproximadamente $1.368,00 \text{ W m}^{-2} \pm 7$ (valor considerado “constante” na meteorologia chamado de constante solar) [26]. Iremos considerar em nossos cálculos o valor medido de IRR, mostrado na Figura 4, em cada período simulado. Esse fluxo de energia incidente é atenuado entre o topo da atmosfera e a superfície terrestre, respondendo principalmente às condições de cobertura de nuvens do céu. A “facilidade” com a qual essa energia é transportada do topo da atmosfera para a superfície da Terra é medida pelo parâmetro Transmissividade, dado por:

$$T = (0,60 + 0,20 \cdot \sin \Psi) \cdot (1 - 0,40 \sigma_H) \cdot (1 - 0,70 \sigma_M) \cdot (1 - 0,40 \sigma_L) \quad (3)$$

onde σ_H , σ_M e σ_L representam, respectivamente, as frações de cobertura de nuvens altas (base > 6.000m de altitude), médias (base entre 2.000 e 6000 m de altitude) e baixas (base < 2.000 m de altitude). Neste trabalho as nuvens altas e médias foram desconsideradas, pois, apenas o efeito dos RC na produção de nuvens baixas é encontrado na literatura (Figura 3). De acordo com a Figura 3 para os anos de 1996 e 2002, temos σ_L respectivamente, 0,29 e 0,24. Sendo assim, para 1996, temos

$$T = (0,60 + 0,20 \cdot \sin 90^0)(1 - 0,40 \cdot 0,29)$$

$$T = 0,71$$

$$K_1 = - 1360,70 \cdot 0,71 \cdot \sin(90^0)$$

$$K_{1(1996)} = - 966,10 \text{ W m}^{-2}$$

e para 2002, temos

$$T = (0,60 + 0,20 \cdot \sin 90^0)(1 - 0,40 \cdot 0,24)$$

$$T = 0,72$$

$$K_1 = - 1361,80 \cdot 0,72 \cdot \sin(90^0)$$

$$K_{1(2002)} = - 980,50 \text{ W m}^{-2}$$

Dependendo do tipo de superfície, a reflexão dessa energia (K_1) ocorre de forma mais ou menos importante. Essa capacidade de reflexão é dada pelo parâmetro Albedo (A) e o fluxo de energia que retorna ao espaço pode ser calculado por

$$K_2 = - A \cdot K_1 \quad (4)$$

Neste trabalho assumimos $A = 0,1$, que corresponde ao A da água [26], pois, consideramos que a superfície do planeta é coberta 70% por água. Sendo assim para 1996 temos

$$K_2 = - 0,10 \cdot (- 966,10)$$

$$K_{2(1996)} = 96,61 \text{ W m}^{-2}$$

e para 2002

$$K_2 = - 0,10 \cdot (- 980,50)$$

$$K_{2(2002)} = 98,05 \text{ W m}^{-2}$$

O balanço do fluxo de ondas longas é dado por:

$$I^* = 98,50 (1 - 0,10 \sigma_H - 0,30 \sigma_M - 0,60 \sigma_L) \quad (5)$$

onde $I^* = I_1 + I_2$. Assim para 1996 temos

$$I^*(1996) = 81,36$$

e para 2002

$$I^*(2002) = 84,32$$

Sendo assim, encontramos um τ^* de $788,13 \text{ W m}^{-2}$ para o período de mínimo (ano de 1996) e de $798,13 \text{ W m}^{-2}$ para o período de máximo solar (ano de 2002).

Tais valores, listados na Tabela 2, podem ser comparados com os balanços de radiação obtidos para os mesmos períodos, mas, considerando: 1) a constante solar padrão adotada em estudos meteorológicos ($S = 1.368,00 \text{ W m}^{-2}$) e a média anual de nuvens baixas de 1996 ($\sigma_L = 0,29$) e de 2002 ($\sigma_L = 0,24$); 2) a constante solar padrão ($S = 1.368,00 \text{ W m}^{-2}$) e o valor médio entre média anual de nuvens baixas de 1996 e 2002 ($\sigma_L = 0,27$); 3) a irradiância solar de 1996 ($S = 1.360,70 \text{ W m}^{-2}$) e de 2002 ($S = 1.361,80 \text{ W m}^{-2}$) e o valor médio entre média anual de nuvens baixas dos dois respectivos anos ($\sigma_L = 0,27$).

Tabela 2: Balanço da radiação solar para o ano de 1996 (mínimo solar) e 2002 (máximo solar), considerando as variações de σ_L e IRR de acordo com o ciclo solar.

Condições	1996 (mínimo)	2002 (máximo)	% Variação Mínimo – Máximo
Variando σ_L e IRR	$\sigma_L = 0,29$ $S = 1.360,70 \text{ W m}^{-2}$ $\tau^* = 788,13 \text{ W m}^{-2}$	$\sigma_L = 0,24$ $S = 1.361,80 \text{ W m}^{-2}$ $\tau^* = 798,13 \text{ W m}^{-2}$	1,3%
Variando σ_L (IRR cte.)	$\sigma_L = 0,29$ $S = 1.368,00 \text{ W m}^{-2}$ $\tau^* = 792,79 \text{ W m}^{-2}$	$\sigma_L = 0,24$ $S = 1.368,00 \text{ W m}^{-2}$ $\tau^* = 802,14 \text{ W m}^{-2}$	1,2%
Variando IRR (σ_L cte.)	$\sigma_L = 0,27$ $S = 1.360,70 \text{ W m}^{-2}$ $\tau^* = 786,95 \text{ W m}^{-2}$	$\sigma_L = 0,27$ $S = 1.361,80 \text{ W m}^{-2}$ $\tau^* = 787,65 \text{ W m}^{-2}$	0,1%

Analisando os resultados expostos na tabela 2 é possível perceber a relação discutida neste trabalho entre a IRR (mínimo e máximo solar), os RC e conseqüentemente a formação

de nuvens baixas. A taxa de variação do balanço de τ^* do período mínimo para o máximo solar, de acordo com as condições propostas (variação ou constância de IRR e σ_L) mostram, corroborando com os resultados de Stott, Jones e Mitchell [10], que somente a IRR não seria capaz de produzir significantes mudanças climáticas no planeta. Isso é confirmado quando é calculada a variação do mínimo para o máximo solar com σ_L constante, variando apenas o IRR. O valor de 0,1% é exatamente a amplitude da variação cíclica de 11 anos proposta por Reid [9], que só é capaz de produzir algum efeito no clima terrestre se amplificada por alguns processos como os efeitos causados pelos RC na cobertura de nuvens, o que é evidenciado pela variação de 1,3% e 1,2% quando respectivamente variam-se os dois fatores (IRR e σ_L) e apenas o σ_L , mantendo a IRR constante. Tais variações estão acima 0,6 %, o que poderiam justificar abruptas mudanças na temperatura da Terra [11]. Esses resultados sugerem que a variação da cobertura de nuvens baixas induzida pela modulação dos raios cósmicos pode provocar significativas mudanças nas condições climáticas terrestre.

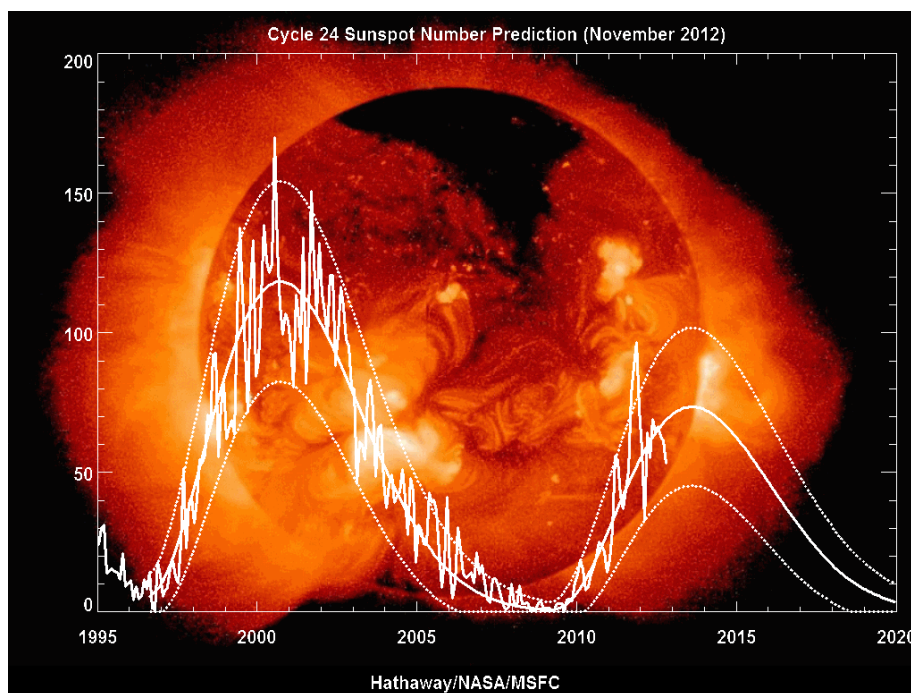


Figura 6 – Progressão do número de manchas solares prevista pela NASA em novembro de 2012. O eixo vertical representa o número de manchas solares e o horizontal, os anos. A linha contínua representa a progressão medida do último ciclo solar (ciclo 23) até o ano de 2012 e a progressão prevista a partir desse ano até o próximo ciclo solar (ciclo 25) [27].

Considerando o período do ciclo solar atual e o efeito cumulativo da variação do fluxo de energia pode-se prever prováveis condições climáticas e com isso propor projetos de minimização dos impactos negativos referentes às mudanças do clima em regiões de risco. A Figura 6 apresenta uma previsão do próximo ciclo solar (Ciclo 24) esperado, que segundo a NASA terá o seu máximo em 2013. De acordo com esta previsão, o período de máximo solar do próximo ciclo terá uma intensidade menor que a do último, ocorrido em 2002 (Figura 2), estando o número de manchas solares previsto para aproximadamente 73, o que pode implicar em uma menor modulação da radiação nos raios cósmicos e com isso um maior taxa de formação de nuvens em relação ao último ciclo. De acordo com a NASA os dados observados e previstos caracterizam o Ciclo 24 como sendo o de menor número de manchas desde o Ciclo 14, que teve um máximo com 64,2 manchas solares em fevereiro de 1906 [27].

Aplicação em projetos ambientais

Considerando a modulação da atividade solar nos raios-cósmicos e conseqüentemente a ação dessas partículas no processo de formação de nuvens baixas, a partir das previsões do número de manchas solares baseadas nos ciclos expostos nesse trabalho, podem-se estimar períodos com temperaturas mais altas ou mais baixas, além do incremento ou diminuição das nuvens, o que acarreta em uma maior ou menor taxa de precipitação. Tais estudos são importantes inicialmente para adoção de medidas não estruturais em procedimentos complementares no gerenciamento de riscos associados a mudanças climáticas atuando como sistemas de monitoramento e alerta.

No ano de 2010 e em alguns anos anteriores a região de Angra dos Reis (RJ) foi palco de catástrofes envolvendo deslizamentos de encostas devido às chuvas contínuas que abrangeram a região, além de desencontro entre projetos arquitetônicos e as características geológicas dos terrenos. Essas chuvas podem vir a ser caracterizadas pela formação de nuvens induzidas pelos efeitos dos raios cósmicos no período de mínimo solar do ciclo atual. Assim, uma vez previstos os possíveis efeitos da atividade solar no clima terrestre, esse conhecimento complexo pode auxiliar na elaboração e implantação de projetos de engenharia ambiental com o intuito de encontrar soluções mais efetivas para prevenir ou minimizar os danos prováveis de incidir sobre as áreas mais vulneráveis. Como esses efeitos estão sendo estudados em âmbito global, torna-se difícil limitar ou mesmo padronizar determinados projetos neste trabalho, pois, estes devem adequar-se às características sociais, ambientais e econômicas de determinada região. Mas, de um modo geral principalmente para épocas relacionadas ao

aumento ou diminuição da precipitação, projetos de prevenção ou minimização de eventos extremos como desmoronamentos, inundações, secas e erosões podem ser elaborados. Para tanto é necessário também que se tenha um olhar crítico sobre a configuração da paisagem, tanto em relação aos componentes naturais quanto aos resultantes de ações e atividades antrópicas [28].

Uma pesquisa de Informações Básicas Municipais - MUNIC feita pelo IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística em 2002 apontou que os maiores desastres relacionados a inundações, escorregamentos e erosão estão fortemente associados à degradação de áreas frágeis, potencializada pelo desmatamento e ocupação irregular [28]. Isso demonstra que o uso impróprio de recursos naturais, a ocupação de áreas mais suscetíveis e o desmatamento são fatores que potencializam a ocorrência de desastres naturais em períodos de mudanças climáticas extremas. Desta forma, é fundamental que, para a redução ou mesmo prevenção de desastres, a partir dos dados previstos, tenha-se uma estratégia sob a ótica do desenvolvimento sustentável no intuito de fortalecer políticas de ordenamento territorial, concomitantes a políticas de acesso à habitação, ao combate do desmatamento e da degradação de áreas ambientalmente vulneráveis. Projetos de drenagem em áreas de solos encharcados, muitas vezes, também são eficientes.

Mapeamentos, por meio de imagens de satélite e de dados altimétricos, para identificação dessas áreas é de extrema importância para caracterização em diferentes níveis de risco de modo a serem estabelecidas medidas preventivas e/ou corretivas e ainda administrativas junto a ações de controle de uso e ocupação do solo [29]. Esses mapeamentos além de abrangerem a topografia podem auxiliar a prevenir os desastres naturais pelo uso de imagens de satélites meteorológicos como o GOES que gera imagens a cada 3 horas, sendo suficiente para determinar modelos numéricos computacionais, assegurando qualidade nas previsões de médio e longo prazo [30].

As enchentes e inundações são também relevantes problemas relacionados à vulnerabilidade ambiental em épocas de chuvas intensas. Para tanto necessitam de medidas de controle e prevenção para minimizar os danos causados. Dentre tais medidas pode-se citar as tradicionais obras de engenharia para o controle das enchentes e/ problemas decorrentes como: construção de diques, reservatórios, canal de desvio, bacias de amortecimento e retificação dos cursos d'água [28]. Para tanto se faz necessário um mapeamento das áreas vulneráveis à inundação. Ações de planejamento são também instrumentos importantes para

minimização desse impacto, devendo considerar a definição dos riscos de ocupação para as faixas de superfície de inundação e da tipologia das construções.

Para períodos de seca a previsão também se faz necessária, para que um planejamento prévio aliado à conservação da água e do solo, como a preservação dos rios e armazenamento da água das chuvas, seja implementado.

CONCLUSÃO

A natureza é uma teia interconexa de relações, dependendo do observador humano e do processo de conhecimento para a identificação dos fenômenos, que uma vez interconectados, torna-se impossível entendê-los por parte. Para compreendermos qualquer um é necessário entender todos os outros [31].

Assim o propósito desse trabalho, por meio de uma abordagem sistêmica na ciência, foi o de tentar fornecer uma concepção mais complexa sobre as mudanças climáticas na Terra, auxiliando para a ampliação da visão de um engenheiro ambiental na busca de resultados mais precisos em seus projetos. Para tanto, foi demonstrada uma forte conexão das mudanças do clima terrestre com o restante do universo, por fatores que ultrapassam os limites do planeta. Os resultados mostraram que ao contrário do que o último relatório do IPCC (2007) previu, a variabilidade da atividade solar tem uma contribuição significativa para a mudança do clima da Terra, conjugada a outros fatores como a ação dos raios cósmicos e a formação de nuvens baixas. Os valores encontrados junto ao balanço de radiação feito para os períodos de mínimo (ano de 1996) e máximo solar (ano de 2002) do último ciclo, como mostra a Tabela 2, confirmaram que a cobertura de nuvens ampliada pela ação dos raios cósmicos em núcleos de condensação, como por exemplo, os aerossóis, é o principal fator responsável pelas mudanças climáticas na Terra.

Dessa forma, o conhecimento prévio do período e da intensidade dos mínimos e máximos solares dos ciclos de 11 anos da atividade do Sol tornam ferramentas indispensáveis para auxiliar projetos de prevenção e/ou minimização de impactos relacionados a eventos extremos condicionados, em grande parte, pelas bruscas mudanças do clima da Terra.

AGRADECIMENTOS

À Prof^a. Dr^a. Alessandra Pacini, que com seu extenso conhecimento e tamanha generosidade orientou-me constantemente nesse processo de conexão e ampliação de visão do mundo da engenharia;

Ao Prof. Dr. Sergio Pilling, que deu o “start” ao trabalho sugerindo-me esse tema tão fascinante o qual me permitiu demonstrar a interconexão dos fenômenos naturais do nosso planeta com o universo;

À Prof^a. Dra. Diana Andrade que me incentivou a expandir meus conhecimentos sobre o universo;

À Prof. Dra. Maria Regina Aquino e ao Prof. Dr. Eduardo de Britto Bastos que acreditaram no desenvolvimento dessa pesquisa;

A todos os professores da graduação que de alguma forma contribuíram com o prévio conhecimento para a elaboração desse trabalho e

Aos meus colegas de curso que tiveram grande contribuição em todo processo de ensino e aprendizagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IPCC. Climate change assessments: Review of the processes and procedures of the IPCC. InterAcademy Council, USA (2010) 103. Disponível em: <http://reviewipcc.interacademycouncil.net/report.html>. Acesso em: 16/07/12.
- [2] B. Pillans, J. Chappell, T. R. Naish. A review of the Milankovitch climatic beat: template for Plio–Pleistocene sea-level changes and sequence stratigraphy. *Sedimentary Geology*, **122**, (1998) 5.
- [3] J. G. R. Silva. Ciclos Orbitais ou Ciclos de Milankovitch. 2007. Disponível em: http://vsites.unb.br/ig/glossario/textos/Cicloestratigrafia_e_Milankovith.pdf. Acesso em: 31/08/2012.
- [4] H. Svensmark, E. F. Christensen. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **59**, 11 (1997) 1225.
- [5] B. Braga et al. *Introdução à Engenharia Ambiental*. Prentice Hall, São Paulo (2002) 170.
- [6] R. M. Goody, J. C. G. Walker. *Atmosferas planetárias*. Edgard Blücher, São Paulo (1975) 42.

- [7] A. A. Pacini. The role of hydrogen and beryllium isotopes as tracers of solar and climate variability. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, (2010).
- [8] J. D. Haigh. The Impact of Solar Variability on Climate, *Science*, **272**, (1996) 981.
- [9] Y. Reid. *Space Science Review*, **94**, (2000) 1.
- [10] P. A. Stott, G. S. Jones, J. F. B Mitchell. Do Models Underestimate the Solar Contribution to Recent Climate Change?. *J. Climate*, **16**, (2003) 4079.
- [11] J. Lean, D. Rind. Evaluating Sun-climate relationships since the Little Ice Age, *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys*, **61**, n. 1-2, (1999) 25.
- [12] V. I. Ermakov, Y. I Stozhkov. Cosmic Rays in the mechanism of thundercloud production. 28th International Cosmic Ray Conferenc. Universal Academy Press, Inc. (2003) 4157.
- [13] J.D. Haigh. The Sun and the Earth's Climate, *Living Rev. Solar Phys.*, **4**, n. 2, (2007).
- [14] M. R. da Silva. Modulação heliosférica ou interplanetária de raios cósmicos e Interação dos raios cósmicos com o campo magnético e a atmosfera terrestres. Exame de Qualificação de Doutorado. Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2006).
- [15] H. Fichtner, K. Scherer, The heliosphere: a brief overview. Copernicus Gesellschaft, Katlenburg-Lindau, (2000) 1.
- [16] I. G. Usoskin, G.A. Kovaltsov, A. Gennady. Cosmic rays and climate of the Earth: Possible connection. *C. R. Geoscience* **340**, (2008) 441.
- [17] J. Kirkby et al. Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation. *Nature*, **476**, (2011) 429.
- [18] J.E Kristjánson. J. Kristiansen, E. Kaas. Solar activity, cosmic rays, clouds and climate – an update. *Advances in Space Research* **34** (2004) 407.
- [19] P. Mayewski et al. Holocene climate variability. *Quaternary Research* **62** (2004) 243.
- [20] K. A. Maasch. 2000-year context for modern climate change. *Geogr. Ann.*, **87** A (1) (2005) 7.
- [21] O. Solomina. et al. Historical and Holocene glacier–climate variations: General concepts and overview. *Global and Planetary Change* **60** (2008) 1.
- [22] F. Steinhilber, J. Beer, C. Fröhlich. Total solar irradiance during the Holocene. *Geophysical Research Letters* **36**, (2009) 1.
- [23] J. A. Eddy. The Maunder Minimum. In *Science*. **192**, Número 4245 (1976) 1189.

- [24] E. Echer et al. O Número de Manchas Solares, Índice da Atividade do Sol. Revista Brasileira de Ensino de Física, **25**, 2 (2003) 157.
- [25] Y.-M Wang, J. L. Lean, N. R. Sheeley Jr. Modeling the sun's magnetic field and irradiance since 1713. The Astrophysical Journal, **625** (2005) 522.
- [26] R. B. Stull. Meteorology today for scientists and engineers. EUA: West Publish CO., (1995) 48.
- [27] NASA. Solar Cycle Prediction. Updated 02/11/2012. Disponível em <http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>. Acesso em: 12/11/12.
- [28] R. F. SANTOS (Org.). Vulnerabilidade Ambiental. MMA, Brasília (2007) 10-102.
- [29] BRASIL. Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios / Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, organizadores – Ministério das Cidades - Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Brasília (2007) 5.
- [30] Z. N. T Barbosa, W. N. de Oliveiras, P. R. Alves. Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas de riscos Estudo de caso: Angra dos Reis –RJ. In Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de INPE (2011) 4940.
- [31] F. Capra. A Teia da Vida: Uma Nova Compreensão Científica dos Sistemas Vivos. Cultrix, São Paulo (1996) 49.