



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/12.21.16.45-RPQ

**MODELO DE CICLO DE CARBONO: UMA
REPRODUÇÃO DO MODELO EM LINGUAGEM LUA
APLICANDO O PARADIGMA DINÂMICA DE
SISTEMAS**

Meiriele Alvarenga Cumplido
Raiane Aparecida Lopes Neves
Rita de Cassya Almeida Sousa

CST-323: Introdução à Modelagem
do Sistema Terrestre Professor: Dr.
Pedro Ribeiro de Andrade Neto

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/4ADRH8B>>

INPE
São José dos Campos
2023

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/12.21.16.45-RPQ

**MODELO DE CICLO DE CARBONO: UMA
REPRODUÇÃO DO MODELO EM LINGUAGEM LUA
APLICANDO O PARADIGMA DINÂMICA DE
SISTEMAS**

Meiriele Alvarenga Cumplido
Raiane Aparecida Lopes Neves
Rita de Cassya Almeida Sousa

CST-323: Introdução à Modelagem
do Sistema Terrestre Professor: Dr.
Pedro Ribeiro de Andrade Neto

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/4ADRH8B>>

INPE
São José dos Campos
2023



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Sumário

| | | |
|------|-------------------------------------|---|
| 1. | Apresentação do Trabalho | 3 |
| 1.1. | Modelo Referência (em Fortran)..... | 3 |
| 1.2. | Modelo Reproduzido (em LUA) | 5 |
| 2. | Comparação entre os Modelos | 7 |
| 3. | Conclusões | 9 |

1. Apresentação do Trabalho

O presente trabalho implementa e discute o modelo de referência denominado *Carbon Cycle Model* (Modelo de Ciclo de Carbono), parte de um conjunto de modelos climáticos simples (*simple climate models*) ou, mais precisamente, de um conjunto de modelos que contemplam o paradigma Dinâmica de Sistemas. Neste paradigma, o sistema é representado por uma coleção de estoques e fluxos e, no modelo em estudo, especificamente, o interesse está nos fluxos de carbono entre os vários estoques (reservatórios) na superfície da Terra.

Enquanto que o modelo de referência foi desenvolvido em linguagem Fortran e executado em SGI Indy2 *scientific workstation*, a reprodução desse modelo se deu com a transcrição do sistema de equações governantes para um código (*script*) em linguagem de programação LUA, utilizando-se editor de texto ZeroBrane Studio e interface de desenvolvimento TerraME.

1.1. Modelo Referência (em Fortran)

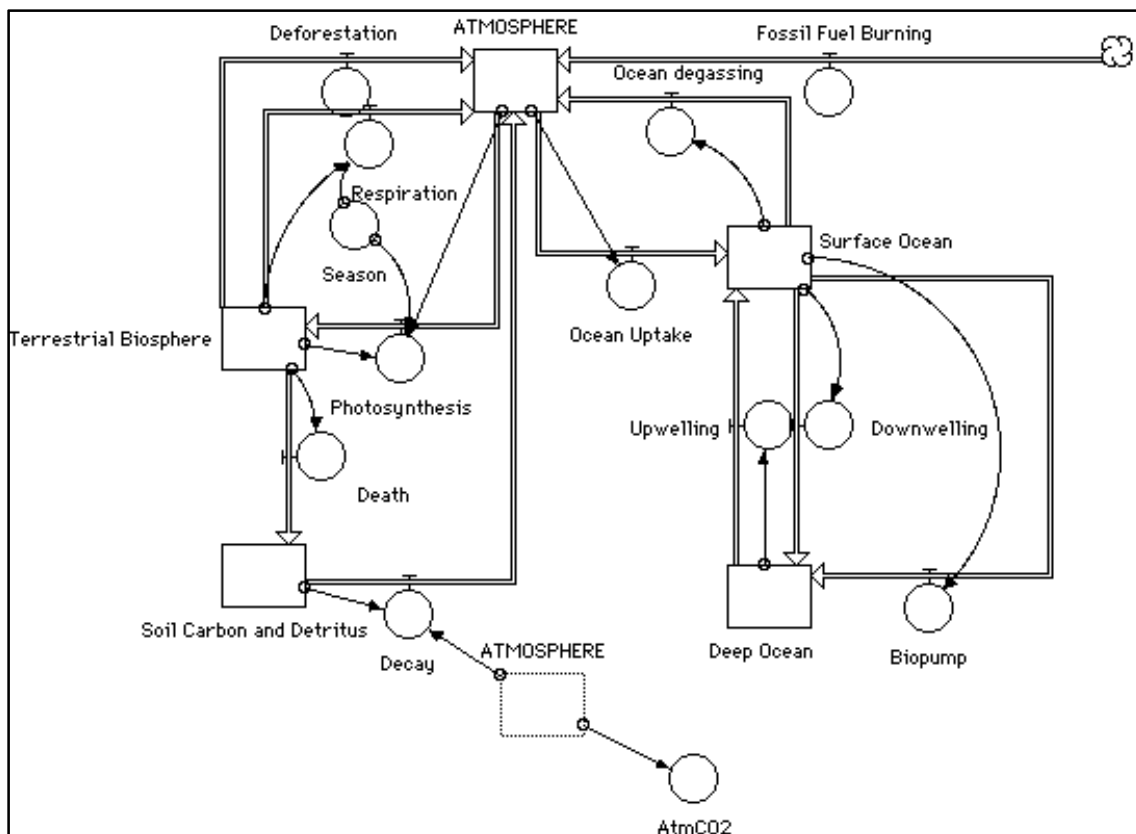
O modelo de ciclo de carbono é um tipo de modelo geralmente chamado de modelo de balanço de massa: cada um dos reservatórios pode ser tratado como um sistema (“subsistema”) fechado, com entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) caracterizando o transporte de massa naquele subsistema. A somatória das entradas, estoques e saídas de massa no sistema como um todo se conserva. Trata-se também de um modelo de curto prazo, em que os processos de transporte de longo prazo, como no caso do fluxo de carbono de e para sedimentos, são desconsiderados.

O modelo integrando todos os subsistemas dinâmicos em formato esquemático para os fluxos de massa entre reservatórios, modelado com o pacote de *software* comercial STELLA®, é trazido na Figura 1. Os retângulos representam os reservatórios e as setas com os pequenos círculos anexados representam os fluxos. Os círculos simples contêm constantes numéricas ou equações algébricas (ou trigonométrica) que representam funções matemáticas, as quais, por sua vez, descrevem os vários processos que afetam a quantidade de carbono que pode ser depositada ou removida de um reservatório. Os reservatórios possuem gigatoneladas de carbono como unidade de medida e os fluxos estão em unidade de gigatoneladas/ano.

O sistema de equações matemáticas considerado no modelo, para descrever os processos de transporte de carbono através do sistema, inclui equações para calcular: a absorção pelo oceano (*ocean uptake*) e desgaseificação do mesmo (*ocean degassing*), a ascensão (*upwelling*) e ressurgência (*downwelling*), a fotossíntese (*photosynthesis*) e respiração (*respiration*) sazonais (*season*), a morte (*death*) e decomposição (*decay*), dentre outros. Os reservatórios são ilustrados

para: atmosfera (*atmosphere*), superfície (*surface ocean*) e profundidade oceânica (*deep ocean*), biosfera terrestre (*terrestrial biosphere*), carbono proveniente do solo e detritos (*soil carbon and detritus*).

Figura 1: Esquemático para os fluxos de massa e reservatórios para o modelo de ciclo de carbono (modelo referência).



De modo a contemplar as contribuições antropogênicas, tem-se a adição de carbono ao reservatório da atmosfera por meio da queima de combustível fóssil (*fossil fuel burning*) e pelo desmatamento (*deforestation*), este partindo da biosfera terrestre. O objetivo principal do modelo é avaliar a quantidade de CO₂ atmosférico (*AtmCO2*) presente em determinado período de tempo ao longo da vida da simulação.

Na Figura 2 é possível visualizar as condições iniciais e demais configurações definidas para o modelo referência, bem como o ícone de execução do modelo (*Run Carbon Cycle*) que, uma vez pressionado, retornará um gráfico com valores de CO₂ atmosférico em função do tempo (discussões sobre o gráfico se encontram no tópico 2 deste relatório).

Figuras, equações e outras informações mencionadas neste tópico estão disponíveis em:

<http://www.shodor.org/master/environmental/general/carbon/carboncs.html>.

Figura 2: Condições iniciais e outras configurações definidas para o modelo de ciclo de carbono (modelo referência).

Short Term Carbon Cycle

You can view the [STELLA model](#) and [mathematical equations](#) used to build this Web interface.

Please enter the following parameters, then click on the "Run" button:

NOTE! Model complexity, simulation time, and system load can affect performance time! Please be patient!

Runtime Values

| | | | |
|--|--------------------------------------|---|-------------------------------------|
| Initial value of the atmosphere (reservoir) | <input type="text" value="700.0"/> | Initial value of the surface ocean (reservoir) | <input type="text" value="700.0"/> |
| Initial value of the terrestrial biosphere (reservoir) | <input type="text" value="550.0"/> | Initial value of the soil carbon and detritus (reservoir) | <input type="text" value="1200.0"/> |
| Initial value of the deep ocean (reservoir) | <input type="text" value="35000.0"/> | Value of the fossil fuel flow | <input type="text" value="5.0"/> |
| Value of the deforestation flow | <input type="text" value="2.0"/> | | |
| Step Time (dt) | <input type="text" value="0.25"/> | Total Simulation time (in years) | <input type="text" value="50.0"/> |

Plotting Options

| | | | | | | | |
|----------------|------------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|-------------------------------------|
| X axis minimum | <input type="text" value="0.0"/> | X axis maximum | <input type="text" value="50.0"/> | Y axis minimum | <input type="text" value="200.0"/> | Y axis maximum | <input type="text" value="1600.0"/> |
| Style | <input type="text" value="lines"/> | Image width | <input type="text" value="640"/> | Image height | <input type="text" value="480"/> | | |

The Shodor Education Foundation, Inc.

Last modified:

1.2. Modelo Reproduzido (em LUA)

O modelo de ciclo de carbono foi reproduzido em linguagem LUA partindo-se da implementação das equações matemáticas listadas na Tabela 1. As equações são aqui escritas conforme a sintaxe reconhecida no código em LUA, respeitando os parâmetros definidos para o modelo (variáveis acompanhadas de um *model*.) e os parâmetros definidos localmente nos eventos, e são provenientes do modelo referência (exceção para a última equação da tabela e para os condicionais na equação *ATMOSPHERE*, detalhados mais adiante neste relatório).

As variáveis multiplicadas pelo passo de tempo *dt* (ou *model.dt*) são aquelas referentes a fluxos de carbono (em gigatoneladas/ano), as outras são referentes a reservatórios (em gigatoneladas de carbono). Ao serem multiplicadas por *dt*, as variáveis de fluxo resultarão em estoque de carbono para um período de tempo determinado.

Em se tratando de tempo, conforme já mencionado, a última equação da tabela (*time* ou *model.time*) é a única que não se encontra explícita no sistema de equações do modelo referência, embora seja uma variável declarada na equação *Season*. Tal equação foi implementada no modelo desenvolvido para representar o tempo “real”, diferente do tempo de simulação (número de iterações) provido pelo argumento *finalTime*. Uma vez que se optou por *finalTime* igual a 200 anos e *dt* igual a 0,25 anos, ao final da simulação, o *time* alcança o valor de 50 anos.

Juntamente com os parâmetros relacionados a tempo, parâmetros referentes a reservatórios (*atmosphere*, *surface ocean*, *deep ocean*, *terrestrial biosphere* e *soil carbon and detritus*) e a fluxos

advindos de contribuições antropogênicas (*fossil fuel burning e deforestation*) são declarados nas condições iniciais do modelo, tendo seus valores baseados nos valores definidos no modelo referência (Figura 2). As condições iniciais, as equações, bem como o comando de geração de gráfico no modelo desenvolvido, são destacados na Figura 3, que traz o *script* escrito em linguagem LUA reproduzindo o modelo referência.

Tabela 1: Equações matemáticas implementadas no código do modelo de ciclo de carbono (modelo reproduzido).

| Equações na sintaxe da linguagem LUA | |
|--------------------------------------|---|
| Ocean_Uptake | = model.ATMOSPHERE/20 |
| Upwelling | = model.Deep_Ocean*.002 |
| Downwelling | = model.Surface_Ocean*.002 |
| Biopump | = 6.76+(model.Surface_Ocean/700) |
| Ocean_Degassing | = model.Surface_Ocean/20 |
| Season | = 1+(math.cos(2*math.pi*(model.time+.125))) |
| Respiration | = model.Terrestrial_Biosphere*.1*Season |
| Photosynthesis | = (model.Terrestrial_Biosphere*.1483+model.ATMOSPHERE/700)*Season |
| Death | = .05*model.Terrestrial_Biosphere |
| Decay | = .021*model.Soil_Carbon_and_Detritus+model.ATMOSPHERE/750 |
| model.Surface_Ocean | = model.Surface_Ocean + ((Ocean_Uptake + Upwelling - Ocean_Degassing - Downwelling - Biopump) * model.dt) |
| model.Deep_Ocean | = model.Deep_Ocean + ((Downwelling + Biopump - Upwelling) * model.dt) |
| model.Terrestrial_Biosphere | = model.Terrestrial_Biosphere + ((Photosynthesis - Respiration - Death - model.Deforestation) * model.dt) |
| model.Soil_Carbon_and_Detritus | = model.Soil_Carbon_and_Detritus + ((Death - Decay) * model.dt) |
| model.ATMOSPHERE | = model.ATMOSPHERE + ((Ocean_Degassing + Respiration + Decay + model.Fossil_Fuel_Burning + model.Deforestation - x*Ocean_Uptake - Photosynthesis) * model.dt), x = 1, .8, .62 |
| model.AtmCO2 | = model.ATMOSPHERE/2 |
| model.time | = model.time + model.dt |

Figura 3: Código do modelo de ciclo de carbono em linguagem LUA (modelo reproduzido) na interface de desenvolvimento ZeroBrane Studio.

```

6 Final Project: Carbon Cycle Model]]
7
8 Carbon = Model{
9     ATMOSPHERE = 700, -- [gigatons of carbon] reservoir
10    Surface_Ocean = 700, -- [gigatons of carbon] reservoir
11    Deep_Ocean = 35000, -- [gigatons of carbon] reservoir
12    Terrestrial_Biosphere = 550, -- [gigatons of carbon] reservoir
13    Soil_Carbon_and_Detritus = 1200, -- [gigatons of carbon] reservoir
14    Fossil_Fuel_Burning = 5, -- [gigatons/year] fluxe
15    Deforestation = 2, -- [gigatons/year] fluxe
16    AtmCO2 = 700/2, -- [gigatons of carbon] AtmCO2 = ATMOSPHERE/2
17    dt = 0.25, -- [year]
18    time = 0, -- [year] "real time"
19    finalTime = 200, -- [year] "simulation time"
20
21    init = function(model)
22        model.chart = Chart{
23            target = model,
24            select = "AtmCO2",
25            xAxis = "time",
26            title = "CO2 atmosférico em função do tempo",
27            xlabel = "Tempo",
28            ylabel = "Atm CO2",
29            color = "black"
30        } -- Chart
31
32        model.timer = Timer{
33            Event{action = model.chart},
34            Event{action = function()
35                local Ocean_Uptake = model.ATMOSPHERE/20
36                local Upwelling = model.Deep_Ocean* .002
37                local Downwelling = model.Surface_Ocean* .002
38                local Biopump = 6.76+(model.Surface_Ocean/700)
39                local Ocean_Degassing = model.Surface_Ocean/20
40                local Season = 1+(math.cos(2*math.pi*(model.time+.125)))
41                local Respiration = model.Terrestrial_Biosphere*.1*Season
42                local Photosynthesis = (model.Terrestrial_Biosphere*.1483+model.ATMOSPHERE/700)*Season
43                local Death = .05*model.Terrestrial_Biosphere
44                local Decay = .021*model.Soil_Carbon_and_Detritus+model.ATMOSPHERE/750
45
46                model.Surface_Ocean = model.Surface_Ocean + ((Ocean_Uptake + Upwelling - Ocean_Degassing - Downwelling - Biopump)
47
48                model.Deep_Ocean = model.Deep_Ocean + ((Downwelling + Biopump - Upwelling) * model.dt)
49
50                model.Terrestrial_Biosphere = model.Terrestrial_Biosphere + ((Photosynthesis - Respiration - Death -
51                model.Deforestation) * model.dt)
52
53                model.Soil_Carbon_and_Detritus = model.Soil_Carbon_and_Detritus + ((Death - Decay) * model.dt)
54
55                if model.time < 10 then
56                    model.ATMOSPHERE = model.ATMOSPHERE + ((Ocean_Degassing + Respiration + Decay + model.Fossil_Fuel_Burning +
57                    - Ocean_Uptake - Photosynthesis) * model.dt)
58                elseif model.time >= 10 and model.time < 15 then
59                    model.ATMOSPHERE = model.ATMOSPHERE + ((Ocean_Degassing + Respiration + Decay + model.Fossil_Fuel_Burning +
60                    - 8*Ocean_Uptake - Photosynthesis) * model.dt)
61                elseif model.time >= 15 then
62                    model.ATMOSPHERE = model.ATMOSPHERE + ((Ocean_Degassing + Respiration + Decay + model.Fossil_Fuel_Burning +
63                    - 62*Ocean_Uptake - Photosynthesis) * model.dt)
64                end
65
66                model.AtmCO2 = model.ATMOSPHERE/2
67                model.time = model.time + model.dt
68            end} -- Event
69        } -- Timer
70    end -- init
71 } -- Carbon
72
73 Carbon:run() -- Execução do código
    
```

Parâmetros do modelo
(condições iniciais)

Gráfico

Equações (com parâmetros
antes da igualdade
definidos no evento)

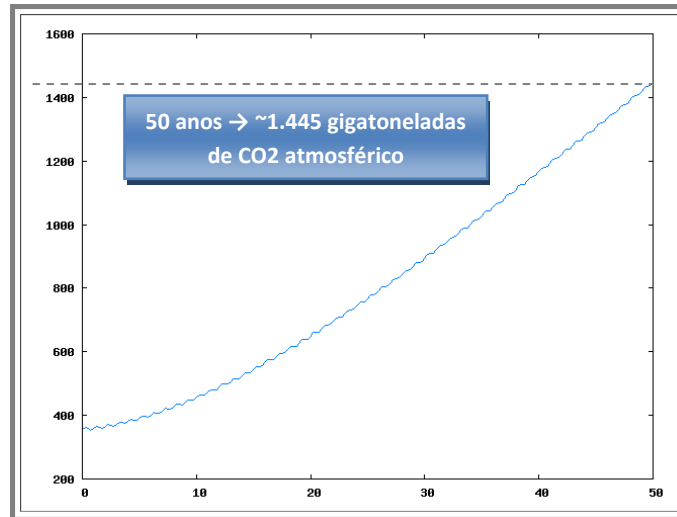
Equações (com parâmetros
antes da igualdade
definidos no modelo)

2. Comparação entre os Modelos

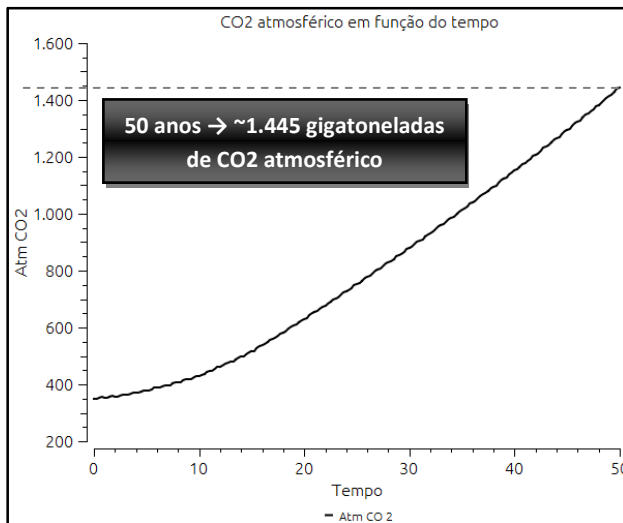
Além da inclusão da equação *time*, o código reproduzido para o modelo de ciclo de carbono considerou também um fator multiplicando a variável *Ocean_Uptake*, na equação *ATMOSPHERE*, após os 10 primeiros anos. Entre 10 e 15 anos, esse fator recebe o valor de 0,8 e a partir de 15 anos, o valor de 0,62. Isso refletiu em um resultado – curva da quantidade de CO2 atmosférico (*AtmCO2*) em função do tempo – para o modelo reproduzido similar ao resultado do modelo referência, conforme mostram as Figura 4 (a) e (b). Sem este fator, o resultado gerado é o mostrado na Figura 4 (c), em que se vê uma diferença considerável no valor da quantidade de CO2 atmosférico no tempo

de 50 anos (diferença relativa próxima a 30%); é um resultado mais otimista quando comparado ao modelo referência, visto que se tem menos CO₂ em um mesmo período de tempo.

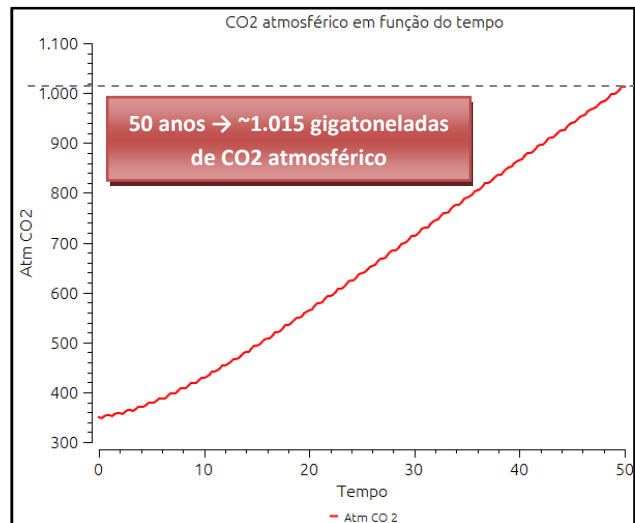
Figura 4: Gráficos de resposta CO₂ atmosférico (*AtmCO₂*) X tempo para (a) modelo referência, (b) modelo reproduzido com o fator e (c) modelo reproduzido sem o fator na equação *ATMOSPHERE*.



(a)



(b)



(c)

Diante da leitura de que uma quantidade maior de CO₂ estaria presente ao fim do período selecionado, tendo em vista o resultado do modelo referência, então um dos fluxos de saída do reservatório atmosfera não constava como condizente no modelo reproduzido. Além do *Ocean_Uptake*, a variável *Photosynthesis* poderia ser modificada para reduzir esse fluxo de saída. No entanto, a variável *Photosynthesis* é função de *Season*, uma equação trigonométrica que provê o comportamento “ondulado” (senoidal) da curva. Ao incluir um fator para essa variável, tal comportamento é comprometido, afastando-se do resultado de referência, enquanto que

multiplicando a variável *Ocean_Uptake*, o fator altera, predominantemente, a quantidade de CO₂ atmosférico.

3. Conclusões

Em termos dos processos biogeoquímicos na natureza, é coerente que o fator acima discutido ($x \cdot \textit{Ocean_Uptake}$, na equação *ATMOSPHERE*) seja alocado para a variável referente à absorção de CO₂ por parte do oceano, traduzindo a capacidade ou eficiência deste processo. Isso porque a eficiência de absorção do mesmo pode estar em queda visto que, com uma grande disponibilidade de CO₂ na atmosfera, a priori, há uma grande absorção desse composto por parte do oceano (*nota*: os fitoplânctons realizam fotossíntese e, para isso, capturam o CO₂ da água; CO₂ do ar é então transferido para a água para estabelecer o equilíbrio).

Com o passar do tempo, por se ter grande quantidade de CO₂ já diluída no oceano, que não é um “sumidouro infinito”, menores quantidades do poluente passam a ser transportados do ar para a água, resultando em maiores quantidades de CO₂ presentes na atmosfera (além do processo de degaseificação). Em outras palavras, o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera provoca ainda mais o aumento de CO₂ neste reservatório por comprometer a capacidade de absorção por parte do oceano. Esse comportamento do sistema afetando a ele mesmo, estimulando a sua entrada e amplificando as mudanças no sistema, é um exemplo de *feedback* positivo.

O comportamento senoidal na curva de resultado se dá pela flutuação nas concentrações de CO₂ ao longo das estações do ano; um fenômeno natural por conta da predominância de processos que capturam maior quantidade desse composto na atmosfera (fotossíntese) em certas estações, em detrimento com os processos de emissão ou menor captura de CO₂ (respiração, morte e decomposição) em outras.

Finalmente, por meio dos resultados apresentados em gráficos (Figura 4), comparando o modelo reproduzido com o modelo referência, pode-se concluir que o código desenvolvido em linguagem LUA desempenha, satisfatoriamente, o comportamento do sistema contemplado no modelo de ciclo de carbono e a aplicação do paradigma Dinâmica de Sistemas. Em resumo, o modelo reproduzido descreveu os fluxos de entrada e saída de CO₂ dos reservatórios (estoques) na superfície do planeta e ainda capturou o *feedback* positivo para a entrada referente ao aumento da concentração de CO₂ na atmosfera, apresentando o valor de aproximadamente 1.445 gigatoneladas de CO₂ atmosférico no período de 50 anos.