



Ciencia y Tecnología

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación



CIMAT
UNIDAD MÉRIDA

CUDA - MEMORIA COMPARTIDA

Dr. Francisco J. Hernández López
SECIHTI – CIMAT-Mérida
fcoj23@cimat.mx, www.cimat.mx/~fcoj23



SUMA DE LOS ELEMENTOS DE UN VECTOR

- Creamos el vector “A” en el CPU
- Inicializamos con cualquier valor el vector “A”
- Creamos el vector “d_A” en el GPU
- Copiamos el contenido de “A” del CPU al GPU
- Sumamos los elementos de “d_A” y el resultado lo guardamos en una variable en el GPU
- Copiamos el resultado del GPU al CPU
- Desplegamos la suma de los elementos del vector “A”

SUMA DE LOS ELEMENTOS DE UN VECTOR C1

```
int main(int argc, char* argv[]) {
    double t_ini, t_fin;
    double time_generateData,time_cpu_seconds,time_gpu_seconds;
    double *A;
    double sum_total_cpu,sum_total_gpu;
    long int n=500000000;

    printf("De cuantos elementos son los arreglos\n");
    scanf("%ld", &n);

    t_ini = clock();
    A = generateRandomArray(n);
    t_fin = clock();
    time_generateData = (t_fin - t_ini) / CLOCKS_PER_SEC;

    t_ini = clock();
    sum_total_cpu = sumOfArraySeq(A, n);
    t_fin = clock();
    time_cpu_seconds = (t_fin - t_ini) / CLOCKS_PER_SEC;

    t_ini = clock();
    sum_total_gpu = sumOfArrayGPU(A,n);
    t_fin = clock();
    time_gpu_seconds = (t_fin - t_ini) / CLOCKS_PER_SEC;

    printf("La suma del arreglo en CPU es: %lf \n", sum_total_cpu);
    printf("La suma del arreglo en GPU es: %lf \n", sum_total_gpu);
    printf("Tiempo para generar datos: %lf segundos.\n", time_generateData);
    printf("Tiempo de procesamiento en CPU: %lf segundos.\n",time_cpu_seconds);
    printf("Tiempo de procesamiento en GPU: %lf segundos.\n", time_gpu_seconds);

    free(A);
}
```

SUMA DE LOS ELEMENTOS DE UN VECTOR C2

```
double sumOfArrayGPU(double *A, long int n){
    double *d_A;
    double *d_sum_total;
    double sum_total;

    //1. Crear memoria en la GPU
    cudaMalloc(&d_sum_total, sizeof(double));
    cudaMalloc(&d_A, n * sizeof(double));

    //Inicializamos en cero
    cudaMemset(d_sum_total, 0, sizeof(double));

    //2. Copiar memoria (CPU-->GPU)
    cudaMemcpy(d_A, A, n * sizeof(double), cudaMemcpyHostToDevice);

    //3. Ejecutar función Kernel
    sumOfArrayKernel <<<(n+TPB-1)/TPB,TPB >>> (d_sum_total,d_A,n);
    //sumOfArrayKernel_V2 << <(n + TPB - 1) / TPB, TPB >> > (d_sum_total, d_A, n);

    //4. Copiar memoria (GPU-->CPU)
    cudaMemcpy(&sum_total, d_sum_total, sizeof(double), cudaMemcpyDeviceToHost);

    cudaFree(d_sum_total);
    cudaFree(d_A);
    cudaDeviceReset();
    return(sum_total);
}
```

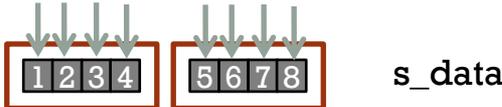
SUMA DE LOS ELEMENTOS DE UN VECTOR C3

```
#define TPB 1024
#define ATOMIC 1 // 0 para no usar el atomicAdd
```

```
__global__ void sumOfArrayKernel(double *d_sum_total, double *d_A, long int n) {
    const long int idx = threadIdx.x + blockDim.x * blockIdx.x;
    const int s_idx = threadIdx.x;
    __shared__ double s_data[TPB];

    s_data[s_idx] = (idx < n) ? d_A[idx] : 0.0;
    __syncthreads();

    if (s_idx == 0) {
        double blockSum = 0.0;
        for (int j = 0; j < blockDim.x; j++) {
            blockSum += s_data[j];
        }
        //printf("Block_%d, blockSum = %lf\n", blockIdx.x, blockSum);
        if (ATOMIC) {
            atomicAdd(d_sum_total, blockSum);
        }
        else {
            *d_sum_total += blockSum; //Resultados no esperados
        }
    }
}
```



$1+2+3+4=10$ $5+6+7+8=26$

$d_sum_total = 10 + 26 = 36$

Para usar atomicAdd con tipos de datos double, necesitamos una GPU con capacidad ≥ 6.0

EXPERIMENTOS EN EL SERVIDOR DE CIMAT-MÉRIDA (SQUADRO8000)



Intel(R) Xeon(R) Gold 5222 CPU @ 3.80GHz
Core(s) per socket: 4
Socket(s): 2
RAM: 48 GB
Disco Duro: 1 TB
Ubuntu 18.04
1 Tarjeta NVIDIA Quadro RTX 8000



Gracias al Proyecto de Infraestructura 2019:
Laboratorio de Supercómputo del Bajío (Lab-SB)

<https://supercomputobajio.cimat.mx/>

TIEMPO DE PROCESAMIENTO

Compilación:

```
nvcc -arch=compute_75 kernel.cu sumatoria_main.cpp -o run_sumatoria
```

```
$ ./run_sumatoria
```

De cuantos elementos son los arreglos

```
1000000000
```

La suma del arreglo en CPU es: **50501072177.000000**

La suma del arreglo en GPU es: **50501072177.000000**

Tiempo para generar datos: 11.004083 segundos.

Tiempo de procesamiento en CPU: **2.367827** segundos.

Tiempo de procesamiento en GPU: **2.570765** segundos.

Nota: El tiempo en GPU incluye la creación de memoria en la GPU, las copias de memoria (CPU→GPU, GPU→CPU) y la ejecución de la función Kernel

TIEMPO DE PROCESAMIENTO DE LA FUNCIÓN KERNEL

```
$ nvprof ./run_sumatoria_clock
```

```
De cuantos elementos son los arreglos
```

```
1000000000
```

```
==2579== NVPROF is profiling process 2579, command: ./run_sumatoria_clock
```

```
La suma del arreglo en CPU es: 50501072177.000000
```

```
La suma del arreglo en GPU es: 50501072177.000000
```

```
Tiempo para generar datos: 11.359986 segundos.
```

```
Tiempo de procesamiento en CPU: 2.364597 segundos.
```

```
Tiempo de procesamiento en GPU: 2.704036 segundos.
```

```
==2579== Profiling application: ./run_sumatoria_clock
```

```
==2579== Profiling result:
```

Type	Time(%)	Time	Calls	Avg	Min	Max	Name
GPU activities:	82.73%	1.88169s	1	1.88169s	1.88169s	1.88169s	[CUDA memcpy HtoD]
	17.27%	392.67ms	1	392.67ms	392.67ms	392.67ms	sumOfArrayKernel()
	0.00%	1.5360us	1	1.5360us	1.5360us	1.5360us	[CUDA memset]
	0.00%	1.3760us	1	1.3760us	1.3760us	1.3760us	[CUDA memcpy DtoH]

$$Speedup = \frac{T_S}{T_P} = \frac{2.36s}{0.39s} \approx 6$$

FUNCIÓN KERNEL V2

```
__global__ void sumOfArrayKernel_V2(double* d_sum_total, double* d_A, long int n) {
    const long int idx = threadIdx.x + blockDim.x * blockIdx.x;

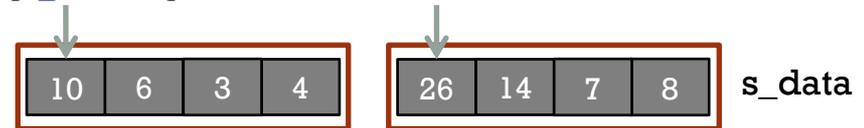
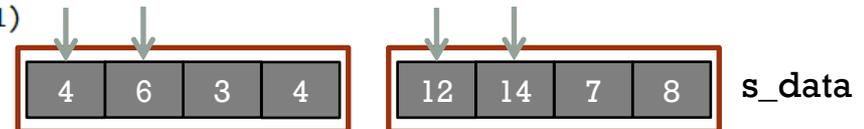
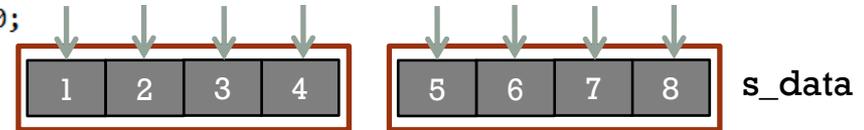
    double blockSum = 0.0;
    const int s_idx = threadIdx.x;
    __shared__ double s_data[TPB];

    s_data[s_idx] = blockSum = (idx < n) ? d_A[idx] : 0.0;
    __syncthreads();

    for (unsigned int s = blockDim.x / 2; s > 0; s >>= 1)
    {
        if (s_idx < s)
        {
            s_data[s_idx] = blockSum = blockSum + s_data[s_idx + s];
        }

        __syncthreads();
    }

    if (s_idx == 0) {
        if (ATOMIC) {
            atomicAdd(d_sum_total, blockSum);
        }
        else {
            *d_sum_total += blockSum; //Resultados no esperados
        }
    }
}
```



$d_sum_total = 10 + 26 = 36$

TIEMPO DE PROCESAMIENTO DE LA FUNCIÓN KERNEL V2

```
$ nvprof ./run_sumatoria_clock
```

```
De cuantos elementos son los arreglos
```

```
1000000000
```

```
==3642== NVPROF is profiling process 3642, command: ./run_sumatoria_clock
```

```
La suma del arreglo en CPU es: 50501072177.000000
```

```
La suma del arreglo en GPU es: 50501072177.000000
```

```
Tiempo para generar datos: 11.100356 segundos.
```

```
Tiempo de procesamiento en CPU: 2.366821 segundos.
```

```
Tiempo de procesamiento en GPU: 2.255754 segundos.
```

```
==3642== Profiling application: ./run_sumatoria_clock
```

```
==3642== Profiling result:
```

Type	Time(%)	Time	Calls	Avg	Min	Max	Name
GPU activities:	95.65%	1.74663s	1	1.74663s	1.74663s	1.74663s	[CUDA memcpy HtoD]
	4.35%	79.424ms	1	79.424ms	79.424ms	79.424ms	sumOfArrayKernel_V2()
	0.00%	1.6640us	1	1.6640us	1.6640us	1.6640us	[CUDA memcpy DtoH]
	0.00%	1.4720us	1	1.4720us	1.4720us	1.4720us	[CUDA memset]

$$Speedup = \frac{T_S}{T_P} = \frac{2.37s}{0.079s} \approx 30$$

PRODUCTO PUNTO (MAIN.CPP)

```
1  /*
2  Ejemplo tomado de:
3  Storti, D., & Yurtoglu, M. (2015).
4  CUDA for engineers: an introduction to high-performance parallel computing.
5  Addison-Wesley Professional.
6  Chapter 6.
7
8  Ejemplo de Sumatorias en paralelo usando CUDA
9  Calculo del producto punto entre dos vectores
10
11  *Usando funciones Atómicas para realizar la sumatoria final de cada bloque de hilos
12  */
13
14  #include "kernel.h"
15  #include <stdio.h>
16  #include <stdlib.h>
17  #define N 1024      //Probar con 1025
18
19  int main() {
20      int cpu_res = 0;
21      int gpu_res = 0;
22      int *a = (int*)malloc(N * sizeof(int));
23      int *b = (int*)malloc(N * sizeof(int));
24
25      //Initialize input arrays
26      for (int i = 0; i < N; ++i) {
27          a[i] = 2;
28          b[i] = 1;
29      }
```

```
31      //Serial CPU
32      for (int i = 0; i < N; ++i) {
33          cpu_res += a[i] * b[i];
34      }
35      printf("cpu result = %d\n", cpu_res);
36
37      //Parallel GPU
38      dotLauncher(&gpu_res, a, b, N);
39      printf("gpu result = %d\n", gpu_res);
40
41      system("pause");
42      free(a);
43      free(b);
44      return 0;
45  }
```

PRODUCTO PUNTO (KERNEL.H)

```
1  #ifndef KERNEL_H
2  #define KERNEL_H
3
4  void dotLauncher(int *res, const int *a, const int *b, int n);
5
6  #endif
```

PRODUCTO PUNTO (KERNEL.CU)

```
1 #include "kernel.h"
2 #include <stdio.h>
3 #define TPB 64
4 #define ATOMIC 1 // 0 for non-atomic addition
5
6 global
7 void dotKernel(int *d_res, const int *d_a, const int *d_b, int n) {
8     const int idx = threadIdx.x + blockDim.x * blockIdx.x;
9     if (idx >= n) return;
10    const int s_idx = threadIdx.x;
11
12    __shared__ int s_prod[TPB];
13    s_prod[s_idx] = d_a[idx] * d_b[idx];
14    __syncthreads(); // Sincroniza los hilos del mismo bloque
15
16    if (s_idx == 0) {
17        int blockSum = 0;
18        for (int j = 0; j < blockDim.x; ++j) {
19            blockSum += s_prod[j];
20        }
21        printf("Block_%d, blockSum = %d\n", blockIdx.x, blockSum);
22        // Try each of two versions of adding to the accumulator
23        if (ATOMIC) {
24            atomicAdd(d_res, blockSum);
25        }
26        else {
27            *d_res += blockSum; // Resultados no esperados
28        }
29    }
30 }
```

```
64 void dotLauncher(int *res, const int *a, const int *b, int n) {
65     int *d_res;
66     int *d_a = 0;
67     int *d_b = 0;
68
69     cudaMalloc(&d_res, sizeof(int));
70     cudaMalloc(&d_a, n * sizeof(int));
71     cudaMalloc(&d_b, n * sizeof(int));
72
73     cudaMemset(d_res, 0, sizeof(int));
74     cudaMemcpy(d_a, a, n * sizeof(int), cudaMemcpyHostToDevice);
75     cudaMemcpy(d_b, b, n * sizeof(int), cudaMemcpyHostToDevice);
76
77     dotKernel <<< (n + TPB - 1) / TPB, TPB >> (d_res, d_a, d_b, n);
78     // dotKernel_V2 <<< (n + TPB - 1) / TPB, TPB >> (d_res, d_a, d_b, n);
79     cudaMemcpy(res, d_res, sizeof(int), cudaMemcpyDeviceToHost);
80
81     cudaFree(d_res);
82     cudaFree(d_a);
83     cudaFree(d_b);
84 }
```

PRODUCTO PUNTO (KERNEL.CU) V2

```
32  __global__
33  void dotKernel_V2(int *d_res, const int *d_a, const int *d_b, int n) {
34      const int idx = threadIdx.x + blockDim.x * blockIdx.x;
35      if (idx >= n) return;
36      const int s_idx = threadIdx.x;
37
38      int blockSum = 0;
39      __shared__ int s_prod[TPB];
40      s_prod[s_idx] = blockSum=d_a[idx] * d_b[idx];
41      __syncthreads();
42
43      for (unsigned int s = blockDim.x / 2; s>0; s >>= 1)
44      {
45          if (s_idx < s)
46          {
47              s_prod[s_idx] = blockSum = blockSum + s_prod[s_idx + s];
48          }
49
50          __syncthreads();
51      }
52      if (s_idx == 0) {
53          printf("Block_%d, blockSum = %d\n", blockIdx.x, blockSum);
54          // Try each of two versions of adding to the accumulator
55          if (ATOMIC) {
56              atomicAdd(d_res, blockSum);
57          }
58          else {
59              *d_res += blockSum; //Resultados no esperados
60          }
61      }
62  }
```

MULTIPLICACIÓN DE MATRICES USANDO MEMORIA COMPARTIDA

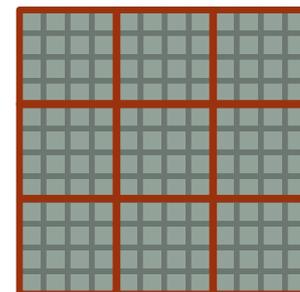
```
//Multiplicacion de Matrices en Memoria Compartida (SM)
//Ver SDK (matrixMul), Each block must be contain BLOCK_SIZE*BLOCK_SIZE threads
__global__ void Multiplica_Matrices_SM(float *C,float *A,float *B,
                                       int nfil,int ncol)
{
    //Indices de Bloques
    int bx = blockIdx.x;
    int by = blockIdx.y;
    //Indices de Hilos
    int tx = threadIdx.x;
    int ty = threadIdx.y;

    // Indice de la primer submatriz A procesada por el bloque
    int aBegin = ncol * BLOCK_SIZE * by;
    // Indice de la ultima submatriz A procesada por el bloque
    int aEnd   = aBegin + ncol - 1;
    // Tamaño de paso para iterar sobre las submatrices de A
    int aStep  = BLOCK_SIZE;
    // Indice de la primer submatriz B procesada por el bloque
    int bBegin = BLOCK_SIZE * bx;
    // Tamaño de paso para iterar sobre las submatrices de B
    int bStep  = BLOCK_SIZE * ncol;
    // Csub is used to store the element of the block sub-matrix
    // that is computed by the thread
    float sum_sub = 0.0f;
```

Ojo: esta variable (acumuladora) está en memoria local para cada hilo lanzado

$bx = [0,1,2]$
 $tx = [0,1,2,3]$

$ty = [0,1,2,3]$
 $by = [0,1,2]$



BLOCK_SIZE=4
aBegin=[0,48,96]
aEnd =[11,59,107]
aStep=4
bBegin=[0,4,8]
bStep=48

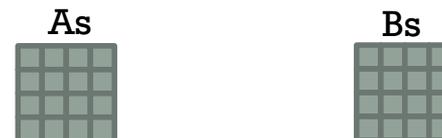
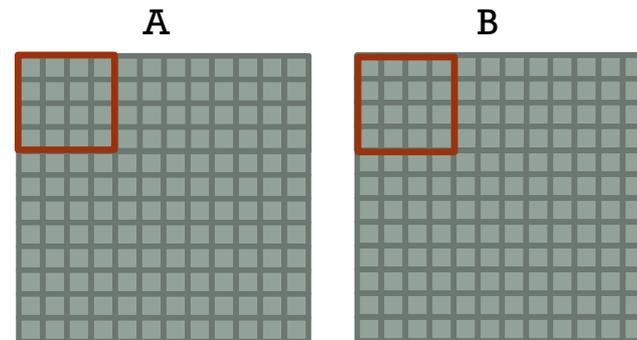
MULTIPLICACIÓN DE MATRICES USANDO MEMORIA COMPARTIDA (C1)

```
// Ciclo sobre todas las submatrices de A y B
for (int a = aBegin, b = bBegin; a <= aEnd; a += aStep, b += bStep) {
    //Memoria compartida para la submatriz A
    __shared__ float As[BLOCK_SIZE][BLOCK_SIZE];
    //Memoria compartida para la submatriz B
    __shared__ float Bs[BLOCK_SIZE][BLOCK_SIZE];

    // Almacenar las matrices desde la memoria global
    // a la memoria compartida; cada hilo almacena
    // un elemento de cada matriz
    As[ty][tx] = A[a + ncol * ty + tx];
    Bs[ty][tx] = B[b + ncol * ty + tx];
    // Sincronizamos los hilos para asegurar que se han cargado las matrices
    __syncthreads();

    // Multiplicamos las dos matrices
    #pragma unroll
    for (int k = 0; k < BLOCK_SIZE; k++)
        sum_sub += As[ty][k] * Bs[k][tx];
    // Sincronizamos para asegurar que el calculo anterior
    // se halla completado, antes de almacenar las nuevas submatrices
    __syncthreads();
}

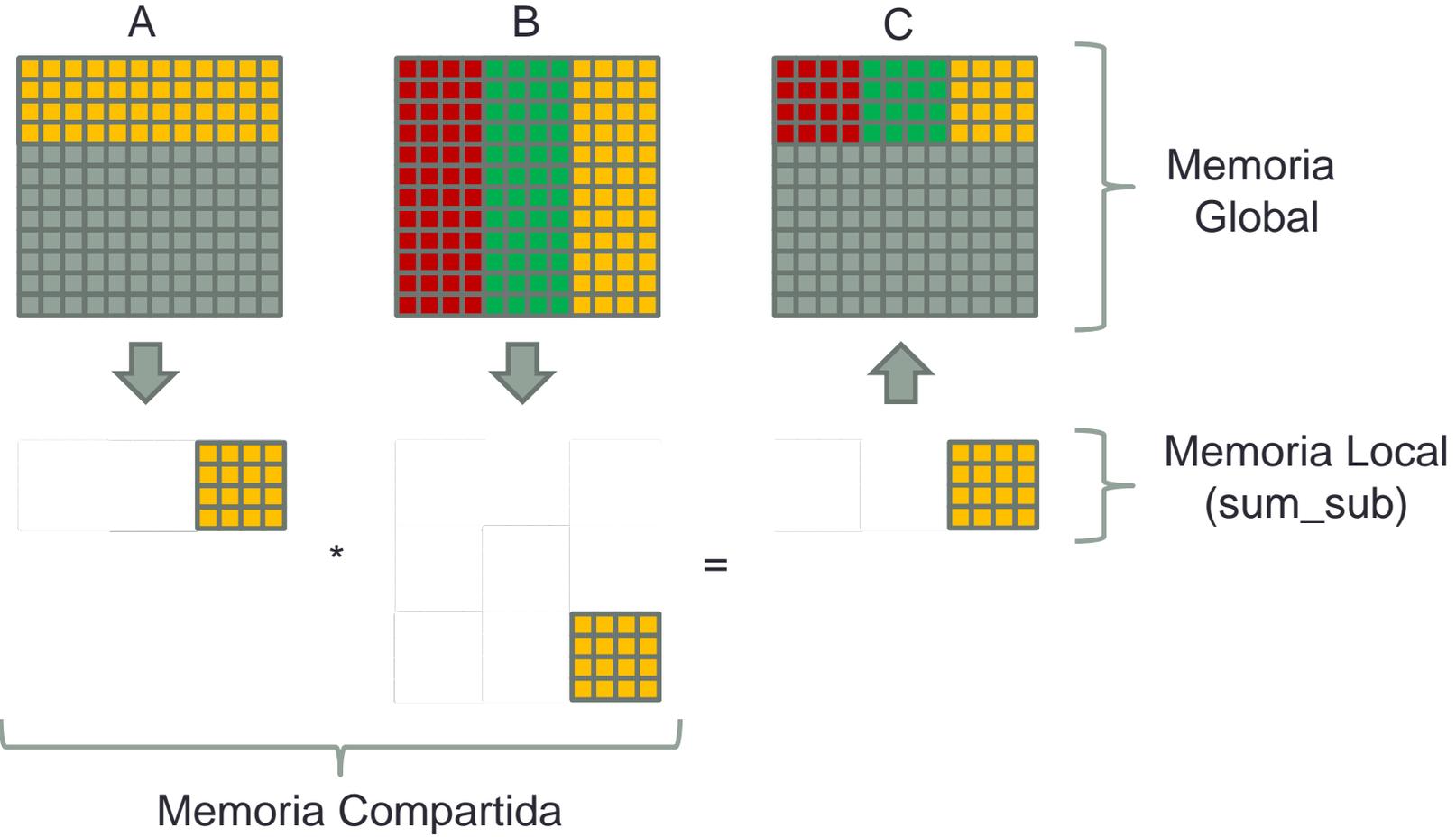
// Guardamos el resultado en la memoria global
// Cada hilo guarda un elemento
int c = ncol * BLOCK_SIZE * by + BLOCK_SIZE * bx;
C[c + ncol * ty + tx] = sum_sub;
}
```



sum_sub va acumulando los productos puntos hasta llegar al último bloque.

Al final se le asigna el resultado de **sum_sub** a la correspondiente posición en la matriz resultante **C**.

MULTIPLICACIÓN DE MATRICES USANDO MEMORIA COMPARTIDA (C2)



GRACIAS POR SU ATENCIÓN

Francisco J. Hernández-López

fcoj23@ciamat.mx

WebPage:

www.cimat.mx/~fcoj23

