

2º curso / 2º cuatr.

Grado en
Ing. Informática

Arquitectura de Computadores

Seminario 2. Herramientas de programación paralela II: Cláusulas OpenMP

Material elaborado por Mancia Anguita



UNIVERSIDAD
DE GRANADA



ICAR

INGENIERÍA DE COMPUTADORES,
AUTOMÁTICA Y ROBÓTICA

Contenidos

- Cláusulas
- Ámbito de los datos por defecto. Cláusulas relacionadas con la compartición de datos
- Cláusulas relacionadas con comunicación/sincronización

Contenidos

- Cláusulas
- Ámbito de los datos por defecto. Cláusulas relacionadas con la compartición de datos
- Cláusulas relacionadas con comunicación/sincronización

Cláusulas

- Ajustan el comportamiento de las directivas

```
#pragma omp parallel num_threads(8) if(N>20)
```

- Las directivas con cláusulas son (v2.5):

- `parallel`

- Directivas de trabajo compartido:

- `DO/for`, `sections`, `single` y `workshare`

- Directivas que combinan `parallel` y directivas de trabajo compartido:

- aceptan cláusulas de las dos directivas que combinan excepto `nowait`

- `parallel DO/for`, `parallel sections`, `parallel workshare`

- Directivas que no aceptan cláusulas (v2.5):

- `master`

- Sincronización/consistencia:

- `critical`, `barrier`, `atomic`, `flush`

- `ordered`

- `threadprivate`

Directivas con cláusulas (v2.5)

DIRECTIVA	ejecutable	declarativa	
con bloque estructurado	<i><u>parallel</u></i> <i><u>sections, worksharing, single</u></i> master critical ordered		Con sentencias
bucle	<i><u>DO/for</u></i>		
simple (una sentencia)	atomic		
autónoma (sin código asociado)	barrier, flush	threadprivate	sin

- Las directivas que aceptan cláusulas aparecen en cursiva

Cláusulas relacionadas con compartición de datos

TIPO	Cláusula	Directivas					
		parallel	DO/for	sections	single	parallel DO/for	parallel sections
Control nº threads	if (1)	X				X	X
	num_threads (1)	X				X	X
Control ámbito de las variables	shared	X				X	X
	private	X	X	X	X	X	X
	lastprivate		X	X		X	X
	firstprivate	X	X	X	X	X	X
	default (1)	X				X	X
	reduction	X	X	X		X	X
Copia de valores	copyin	X				X	X
	copyprivate				X		
Planifica. iteraciones bucle	schedule (1)		X			X	
	ordered (1)		X			X	
No espera	nowait		X	X	X		

Se han destacado en color las cláusulas que se van a comentar en este seminario

Contenidos

- Cláusulas
- **Ámbito de los datos por defecto. Cláusulas relacionadas con la compartición de datos**
- Cláusulas relacionadas con comunicación/sincronización

Ámbito de los datos o atributos de compartición

- Regla general para regiones paralelas (para variables que no se usan en cláusulas o directivas de ámbito):

- Las variables declaradas fuera de una región y las **dinámicas** son compartidas por las threads de la región
- Las variables declaradas dentro son privadas

- Excepciones:

- índice de bucles `for`: ámbito predeterminado de privado
- Variables declaradas `static`

C


```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <omp.h>

main(int argc, char **argv) {
    int i, n=20, a[n], suma=0;
    if(argc < 2) {
        fprintf(stderr, "\nFalta iteraciones\n");
        exit(-1);
    }
    n = atoi(argv[1]); if (n>20) n=20;

    for (i=0; i<n; i++)    a[i] = i;

    #pragma omp parallel
    { int sumalocal=0;
      #pragma omp for schedule(static)
      for (i=0; i<n; i++)
      { sumalocal += a[i];
        printf(" thread %d suma de a[%d]=%d sumalocal=%d \n",
              omp_get_thread_num(), i, a[i], sumalocal);
      }
      #pragma omp atomic
      suma += sumalocal;
    }
    printf("Fuera de 'parallel' suma=%d\n", suma); return(0);
}
```


Cláusulas relacionadas con compartición de datos

TIPO	Cláusula	Directivas					
		parallel	DO/for	sections	single	parallel DO/for	parallel sections
Control nº threads	if (1)	X				X	X
	num_threads (1)	X				X	X
 Control ámbito de las variables	shared	X				X	X
	private	X	X	X	X	X	X
	lastprivate		X	X		X	X
	firstprivate	X	X	X	X	X	X
	default (1)	X				X	X
	reduction	X	X	X		X	X
Copia de valores	copyin	X				X	X
	copyprivate				X		
Planifica. iteraciones bucle	schedule (1)		X			X	
	ordered (1)		X			X	
No espera	nowait		X	X	X		

Cláusulas

TIPO	Cláusula	Directivas					
		parallel	DO/for	sections	single	parallel DO/for	parallel sections
Control nº threads	if (1)	X				X	X
	num_threads (1)	X				X	X
Control ámbito de las variables	shared	X				X	X
	private	X	X	X	X	X	X
	lastprivate		X	X		X	X
	firstprivate	X	X	X	X	X	X
	default (1)	X				X	X
	reduction	X	X	X		X	X
Copia de valores	copyin	X				X	X
	copyprivate				X		
Planifica. iteraciones bucle	schedule (1)		X			X	
	ordered (1)		X			X	
No espera	nowait		X	X	X		

Cláusula `shared`

shared-clause.c [Chapman 2008]

- Sintaxis:
 - `shared(list)`
- Se comparten las variables de *list* por todas los threads
- Precauciones:
 - Cuando **al menos un thread lee lo que otro escribe** en alguna variable de la lista

```
#include <stdio.h>
#ifdef _OPENMP
    #include <omp.h>
#endif

main()
{
    int i, n = 7;
    int a[n];

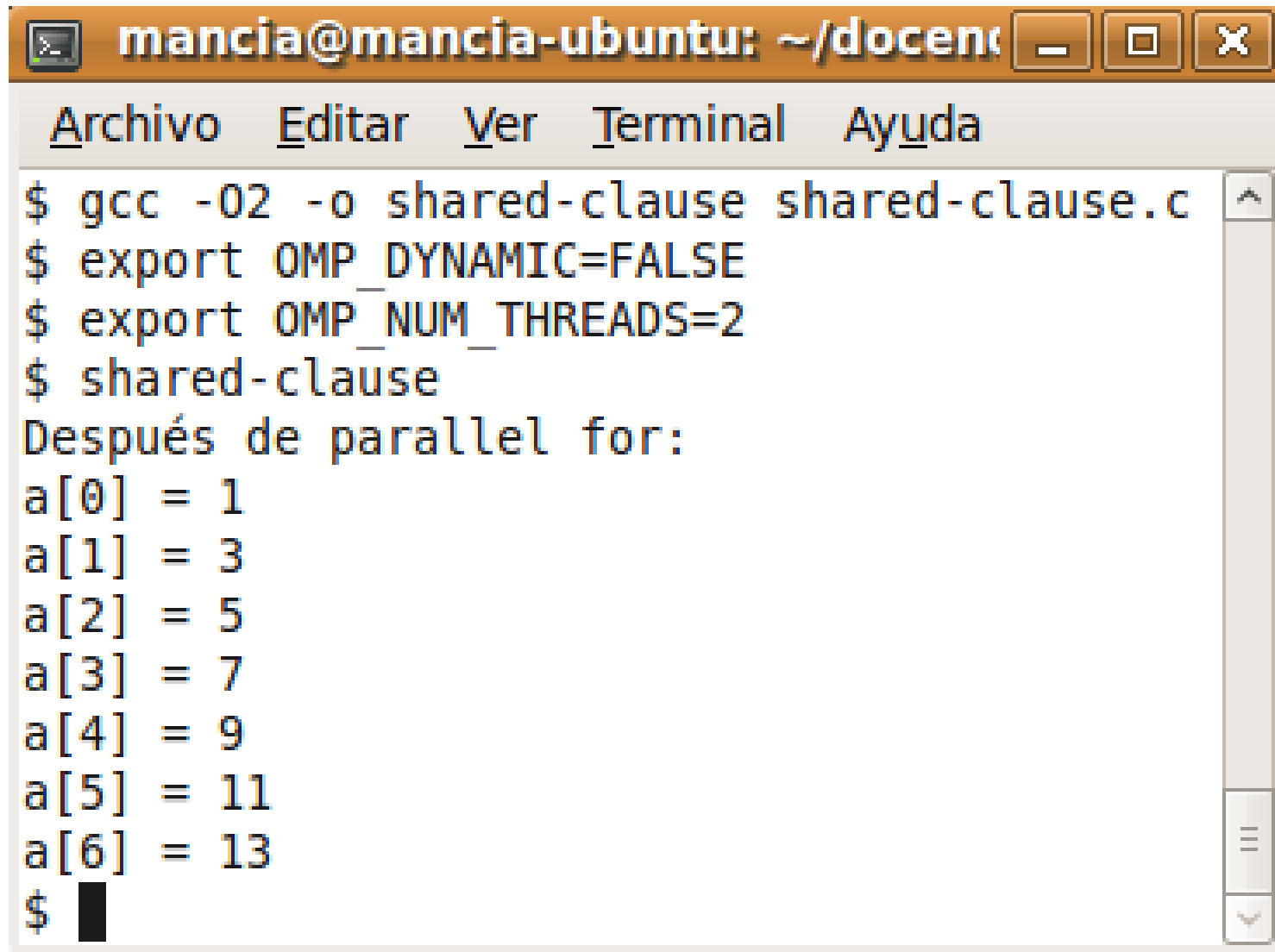
    for (i=0; i<n; i++)
        a[i] = i+1;

    #pragma omp parallel for shared(a)
    for (i=0; i<n; i++)    a[i] += i;

    printf("Después de parallel for:\n");

    for (i=0; i<n; i++)
        printf("a[%d] = %d\n",i,a[i]);
}
```

Cláusula shared. Salida



```
mancia@mancia-ubuntu: ~/docenc
```

Archivo Editar Ver Terminal Ayuda

```
$ gcc -O2 -o shared-clause shared-clause.c
$ export OMP_DYNAMIC=FALSE
$ export OMP_NUM_THREADS=2
$ shared-clause
Después de parallel for:
a[0] = 1
a[1] = 3
a[2] = 5
a[3] = 7
a[4] = 9
a[5] = 11
a[6] = 13
$
```

¿Errata?

Cláusulas

TIPO	Cláusula	Directivas					
		parallel	DO/for	sections	single	parallel DO/for	parallel sections
Control nº threads	If (1)	X				X	X
	num_threads (1)	X				X	X
Control ámbito de las variables	shared	X				X	X
	private	X	X	X	X	X	X
	lastprivate		X	X		X	X
	firstprivate	X	X	X	X	X	X
	default (1)	X				X	X
	reduction	X	X	X		X	X
Copia de valores	copyin	X				X	X
	copyprivate				X		
Planifica. iteraciones bucle	schedule (1)		X			X	
	ordered (1)		X			X	
No espera	nowait		X	X	X		

Cláusula private

private-clause.c

➤ Sintaxis:

➤ `private(list)`

➤ Precauciones:

➤ El valor de **entrada** y de **salida** está **indefinido** aunque la variable esté declarada fuera de la construcción

➤ Predeterminado:

➤ Los índices de un bucle tienen un ámbito **predeterminado** de privado si se usa para ese bucle la directiva `for`

```
#include <stdio.h>
#ifdef _OPENMP
#include <omp.h>
#else
#define omp_get_thread_num() 0
#endif

main()
{
    int i, n = 7;
    int a[n], suma;

    for (i=0; i<n; i++)
        a[i] = i;

    #pragma omp parallel private(suma)
    {
        suma=0;
        #pragma omp for
        for (i=0; i<n; i++)
        {
            suma = suma + a[i];
            printf(
                "thread %d suma a[%d] / ", omp_get_thread_num(), i);
        }
        printf(
            "\n* thread %d suma= %d", omp_get_thread_num(), suma);
    }

    printf("\n");
}
```



Cláusula private. Salida

```
mancia@mancia-ubuntu: ~/docencia/OpenMP/
Archivo  Editar  Ver  Terminal  Ayuda
$ gcc -O2 -fopenmp -o private-clause private-clause.c
$ export OMP_DYNAMIC=FALSE
$ export OMP_NUM_THREADS=4
$ private-clause
Hebra 3 suma a[6] / Hebra 1 suma a[2] / Hebra 1 suma a
[3] / Hebra 2 suma a[4] / Hebra 2 suma a[5] / Hebra 0
suma a[0] / Hebra 0 suma a[1] /
* Hebra 2 suma= 9
* Hebra 1 suma= 5
* Hebra 3 suma= 6
* Hebra 0 suma= 1
$ export OMP_NUM_THREADS=3
$ private-clause
Hebra 2 suma a[6] / Hebra 1 suma a[3] / Hebra 1 suma a
[4] / Hebra 1 suma a[5] / Hebra 0 suma a[0] / Hebra 0
suma a[1] / Hebra 0 suma a[2] /
* Hebra 1 suma= 12
* Hebra 2 suma= 6
* Hebra 0 suma= 3
$ private-clause
Hebra 2 suma a[6] / Hebra 1 suma a[3] / Hebra 1 suma a
[4] / Hebra 1 suma a[5] / Hebra 0 suma a[0] / Hebra 0
suma a[1] / Hebra 0 suma a[2] /
* Hebra 1 suma= 12
* Hebra 2 suma= 6
* Hebra 0 suma= 3
```

Cláusulas

TIPO	Cláusula	Directivas					
		parallel	DO/for	sections	single	parallel DO/for	parallel sections
Control nº threads	if (1)	X				X	X
	num_threads (1)	X				X	X
Control ámbito de las variables	shared	X				X	X
	private	X	X	X	X	X	X
	lastprivate		X	X		X	X
	firstprivate	X	X	X	X	X	X
	default (1)	X				X	X
	reduction	X	X	X		X	X
Copia de valores	copyin	X				X	X
	copyprivate				X		
Planifica. iteraciones bucle	schedule (1)		X			X	
	ordered (1)		X			X	
No espera	nowait		X	X	X		

Cláusula lastprivate

lastprivate-clause.c

➤ Sintaxis:

➤ `lastprivate(list)`

➤ Combina

- la acción de `private` (con)
- la copia (al salir de región paralela) del último valor (en una ejecución secuencial) de las variables de la lista:
 - Construcción bucle: el valor en la última iteración
 - Construcción `sections`: el valor que tenga tras la última sección

```
#include <stdio.h>
#ifdef _OPENMP
#include <omp.h>
#else
#define omp_get_thread_num() 0
#endif

main() {
    int i, n = 7;
    int a[n], v;

    for (i=0; i<n; i++)    a[i] = i+1;

    #pragma omp parallel for lastprivate(v)
    for (i=0; i<n; i++)
    {
        v = a[i];
        printf("thread %d v=%d / ",
               omp_get_thread_num(), v);
    }

    printf("\nFuera de la construcción'parallel for' v=%d\n",
           v);
}
```



Cláusula lastprivate. Salida

```
mancia@mancia-ubuntu: ~/docencia/OpenMP/leccion
Archivo  Editar  Ver  Terminal  Ayuda
$ gcc -O2 -fopenmp -o lastprivate-clause lastprivate-clause.c
$ export OMP_DYNAMIC=FALSE
$ export OMP_NUM_THREADS=3
$ lastprivate-clause
Hebra 2 v=7 / Hebra 1 v=4 / Hebra 1 v=5 / Hebra 1 v=6 / Hebra
0 v=1 / Hebra 0 v=2 / Hebra 0 v=3 /
Fuera de la construcción 'parallel for' v=7
$ lastprivate-clause
Hebra 0 v=1 / Hebra 0 v=2 / Hebra 0 v=3 / Hebra 1 v=4 / Hebra
1 v=5 / Hebra 1 v=6 / Hebra 2 v=7 /
Fuera de la construcción 'parallel for' v=7
$ lastprivate-clause
Hebra 0 v=1 / Hebra 0 v=2 / Hebra 0 v=3 / Hebra 1 v=4 / Hebra
1 v=5 / Hebra 1 v=6 / Hebra 2 v=7 /
Fuera de la construcción 'parallel for' v=7
$
```


Cláusulas

TIPO	Cláusula	Directivas					
		parallel	DO/for	sections	single	parallel DO/for	parallel sections
Control nº threads	If (1)	X				X	X
	num_threads (1)	X				X	X
Control ámbito de las variables	shared	X				X	X
	private	X	X	X	X	X	X
	lastprivate		X	X		X	X
	firstprivate	X	X	X	X	X	X
	default (1)	X				X	X
	reduction	X	X	X		X	X
Copia de valores	copyin	X				X	X
	copyprivate				X		
Planifica. iteraciones bucle	schedule (1)		X			X	
	ordered (1)		X			X	
No espera	nowait		X	X	X		

Cláusula firstprivate

firstprivate-clause.c

➤ Sintaxis:

➤ `firstprivate (list)`

➤ Combina

- la acción de `private` (con)
- la inicialización de las variables de la lista (al entrar en región paralela) (**difusión**)

```
#include <stdio.h>
#ifdef _OPENMP
    #include <omp.h>
#else
    #define omp_get_thread_num() 0
#endif

main() {
    int i, n = 7;
    int a[n], suma=0;

    for (i=0; i<n; i++)    a[i] = i;

    #pragma omp parallel for firstprivate(suma)
    for (i=0; i<n; i++)
    {
        suma = suma + a[i];
        printf(" thread %d suma a[%d] suma=%d \n",
            omp_get_thread_num(), i, suma);
    }

    printf("\nFuera de la construcción parallel suma=%d\n",
        suma);
}
```

Cláusula firstprivate. Salida

```
mancia@mancia-ubuntu: ~/docencia/OpenMP/leccion2/clausulas
Archivo  Editar  Ver  Terminal  Ayuda
$ export OMP_DYNAMIC=FALSE
$ export OMP_NUM_THREADS=3
$ gcc -O2 -fopenmp -o firstprivate-clause firstprivate-clause.c
$ firstprivate-clause
Hebra 1 suma a[3] suma=3
Hebra 1 suma a[4] suma=7
Hebra 1 suma a[5] suma=12
Hebra 0 suma a[0] suma=0
Hebra 0 suma a[1] suma=1
Hebra 0 suma a[2] suma=3
Hebra 2 suma a[6] suma=6

Fuera de la construcción parallel suma=0
$ gcc -O2 -fopenmp -o firstlastprivate-clause firstlastprivate-clause.c
$ firstlastprivate-clause
Hebra 2 suma a[6] suma=6
Hebra 1 suma a[3] suma=3
Hebra 1 suma a[4] suma=7
Hebra 1 suma a[5] suma=12
Hebra 0 suma a[0] suma=0
Hebra 0 suma a[1] suma=1
Hebra 0 suma a[2] suma=3

Fuera de la construcción parallel suma=6
$
```

➤ El segundo código ejecutado usa también lastprivate (suma)

Cláusulas

TIPO	Cláusula	Directivas					
		parallel	DO/for	sections	single	parallel DO/for	parallel sections
Control nº threads	if (1)	X				X	X
	num_threads (1)	X				X	X
Control ámbito de las variables	shared	X				X	X
	private	X	X	X	X	X	X
	lastprivate		X	X		X	X
	firstprivate	X	X	X	X	X	X
	default (1)	X				X	X
	reduction	X	X	X		X	X
Copia de valores	copyin	X				X	X
	copyprivate				X		
Planifica. iteraciones bucle	schedule (1)		X			X	
	ordered (1)		X			X	
No espera	nowait		X	X	X		

Cláusula default

C/C++

```
default (none | shared)
```

- Con `none` el programador debe especificar el alcance de todas las variables usadas en la construcción
 - excepción variables `threadprivate` y los índices en Directivas `con for`
- Se pueden excluir variables del ámbito especificado en `default` con:
 - `shared`, `private`, `firstprivate`, `lastprivate`, `reduction`
- Restricción:
 - Sólo puede haber una cláusula `default`

Contenidos

- Cláusulas
- Ámbito de los datos por defecto. Cláusulas relacionadas con la compartición de datos
- Cláusulas relacionadas con comunicación/sincronización

Cláusulas relacionadas con comunicación/sincronización

TIPO	Cláusula	Directivas					
		parallel	DO/for	sections	single	parallel DO/for	parallel sections
Control nº threads	if (1)	X				X	X
	num_threads (1)	X				X	X
Control ámbito de las variables	shared	X				X	X
	private	X	X	X	X	X	X
	lastprivate		X	X		X	X
	firstprivate	X	X	X	X	X	X
	default (1)	X				X	X
	reduction	X	X	X		X	X
Copia de valores	copyin	X				X	X
	copyprivate				X		
Planifica. iteraciones bucle	schedule (1)		X			X	
	ordered (1)		X			X	
No espera	nowait		X	X	X		

Cláusula reduction

reduction-clause.c

➤ Sintaxis:

➤ `reduction`
(*operator: list*)



➤ Operadores de reducción (v3.0):

C/C++	
tipo	Valor inicial variables locales
+	0
-	0
*	1
&	~0 (bits a 1)
	0
^	0
&&	1
	0

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#ifdef _OPENMP
    #include <omp.h>
#else
    #define omp_get_thread_num() 0
#endif

main(int argc, char **argv) {
    int i, n=20, a[n], suma=0;

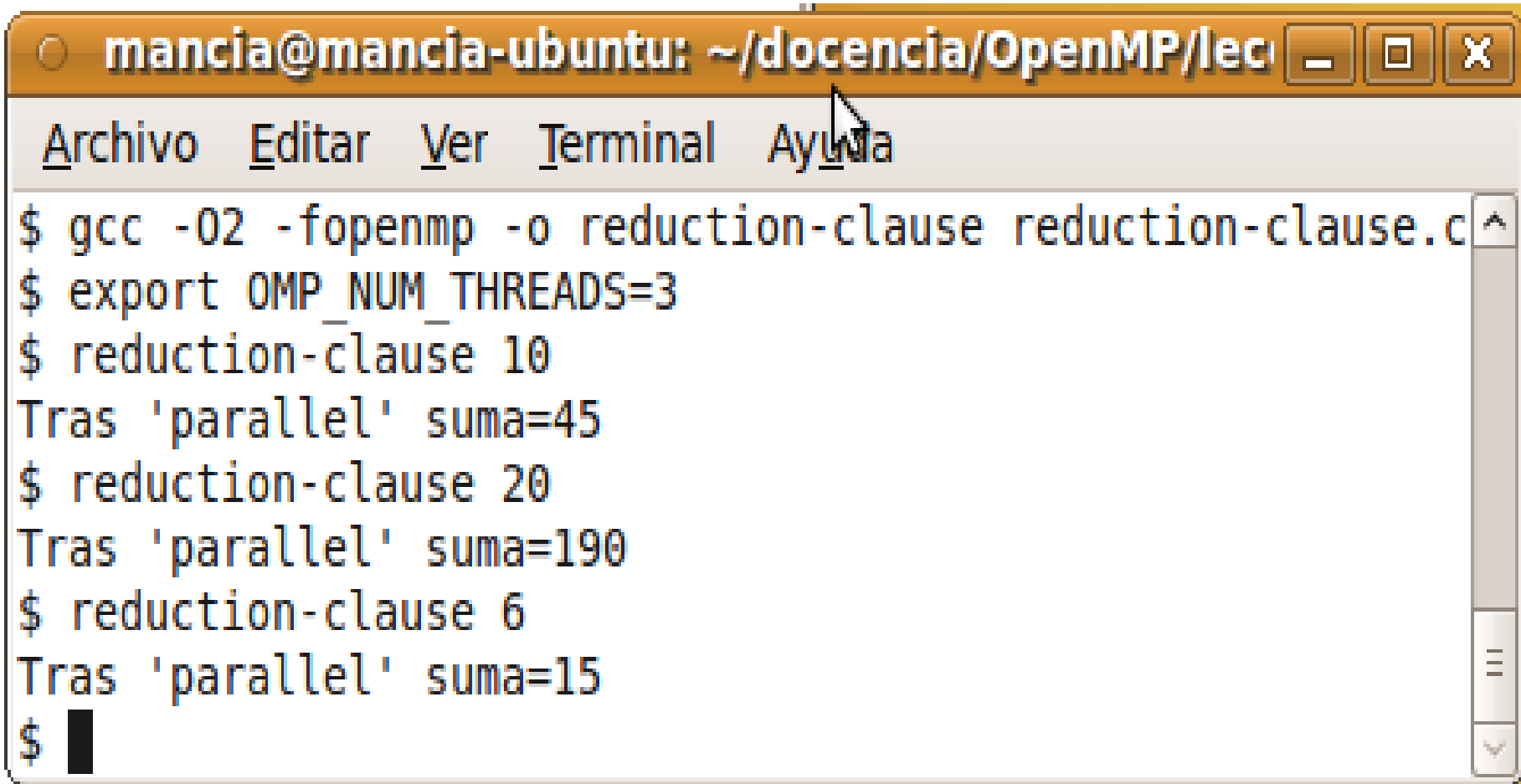
    if(argc < 2) {
        fprintf(stderr, "Falta iteraciones\n");
        exit(-1);
    }
    n = atoi(argv[1]); if (n>20) {n=20; printf("n=%d",n);}

    for (i=0; i<n; i++)    a[i] = i;

    #pragma omp parallel for reduction(+:suma)
    for (i=0; i<n; i++)    suma += a[i];

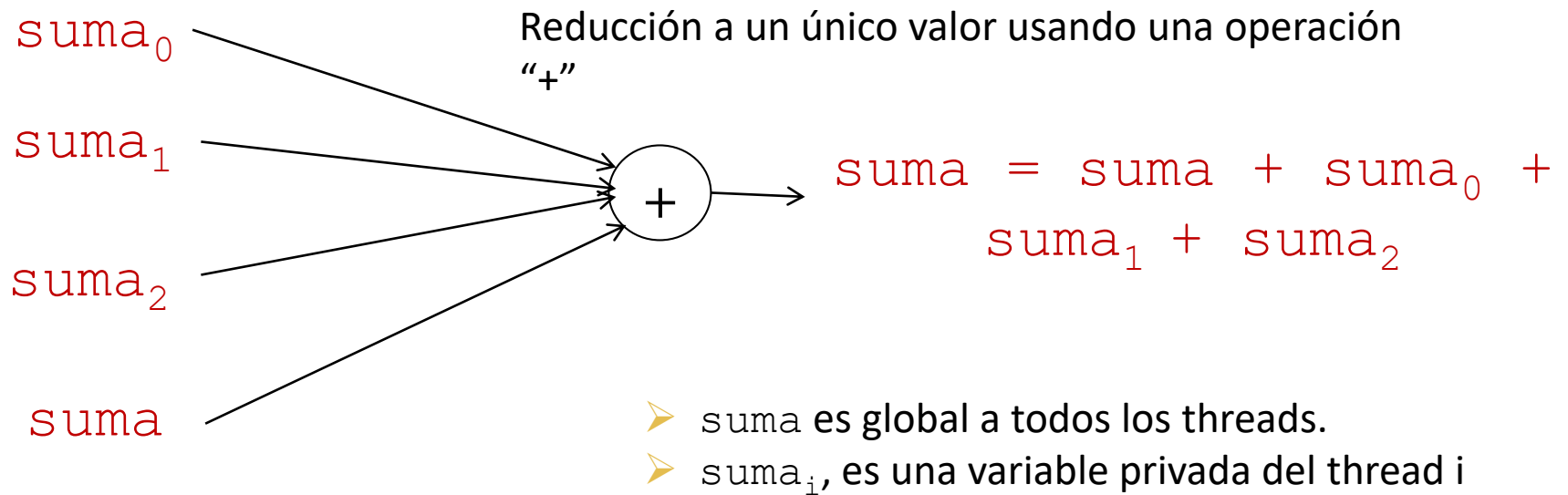
    printf("Tras 'parallel' suma=%d\n", suma);
}
```

Cláusula reduction. Salida

A terminal window titled 'mancia@mancia-ubuntu: ~/docencia/OpenMP/lec' with standard window controls. The menu bar includes 'Archivo', 'Editar', 'Ver', 'Terminal', and 'Ayuda'. The terminal shows a sequence of commands and their outputs: compiling 'reduction-clause.c' with gcc, setting OMP_NUM_THREADS=3, and running 'reduction-clause' three times with arguments 10, 20, and 6. Each run outputs 'Tras 'parallel' suma=' followed by a value. A mouse cursor is visible over the 'Ayuda' menu item.

```
mancia@mancia-ubuntu: ~/docencia/OpenMP/lec
Archivo  Editar  Ver  Terminal  Ayuda
$ gcc -O2 -fopenmp -o reduction-clause reduction-clause.c
$ export OMP_NUM_THREADS=3
$ reduction-clause 10
Tras 'parallel' suma=45
$ reduction-clause 20
Tras 'parallel' suma=190
$ reduction-clause 6
Tras 'parallel' suma=15
$
```


Cláusula reduction



➤ Comunicación colectiva todos a uno (Lección 4/Tema2)

Cláusula copyprivate y directiva single

copyprivate-clause.c

- Sintaxis: 
➤ `copyprivate(list)`
- Sólo se puede usar con `single`
- Permite que una variable privada de un thread se copie a las variables privadas del mismo nombre del resto de threads (**difusión**)
- Útil para lectura (entrada) de variables

```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>

main() {
    int n = 9, i, b[n];

    for (i=0; i<n; i++)    b[i] = -1;

    #pragma omp parallel
    { int a;
      #pragma omp single copyprivate(a)
      {
          printf("\nIntroduce valor de inicialización a: ");
          scanf("%d", &a );
          printf("\nSingle ejecutada por el thread %d\n",
                omp_get_thread_num());
      }
      #pragma omp for
      for (i=0; i<n; i++) b[i] = a;
    }

    printf("Después de la región parallel:\n");
    for (i=0; i<n; i++) printf("b[%d] = %d\t",i,b[i]);
    printf("\n");
}
```